

Aus dem Institut für Tierernährung der Vetsuisse-Fakultät  
Universität Zürich

Direktor: Prof. Dr. med. vet. Dr. h. c. M. Wanner

---

Arbeit unter der Leitung von PD Dr. A. Liesegang und PhD F. Leiber

# **Weide- und Bewegungsverhalten von Schaf und Ziege auf der Alp und dessen Einfluss auf den Knochen- und Energiestoffwechsel**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der  
Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich

vorgelegt von

**Carola Kaulfers**

Tierärztin  
von Hamburg, Deutschland

genehmigt auf Antrag von

PD Dr. A. Liesegang, Referentin  
Prof. Dr. M. Kreuzer, Korreferent

Zürich 2009



Meinen Eltern







# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>1. Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2. Summary</b>	<b>2</b>
<b>3. Einleitung</b>	<b>3</b>
3.1. Ziel der Arbeit	3
3.2. Alpung von Schafen und Ziegen	3
3.3. Gebietsbeschreibung der Alp Weissenstein (Crap Alv)	4
3.3.1. Geographische Lage	4
3.3.2. Klima	5
3.3.3. Geologie und Böden	5
3.3.4. Alpine Flora	7
3.3.4.1. Pflanzengesellschaften der Crap Alv	7
3.3.4.2. Futterwert und Futtermittelanalyse	11
3.4. Ethologie von Schaf und Ziege	11
3.4.1. Nahrungsaufnahmeverhalten („Grazer“ / „Browser“)	11
3.4.2. Bewegungsverhalten	15
3.4.2.1. Exkurs: Überwachung des Bewegungsverhaltens	15
3.4.3. Komfortverhalten	16
3.4.4. Sozialverhalten (Gruppen-, Erkundungs- und Spielverhalten)	16
3.5. Knochen- und Knorpelmorphologie: funktionelle Grundlagen	17
3.5.1. Aufbau des Knochens	17
3.5.1.1. Knochengrundsubstanz	18
3.5.1.2. Knochenzellen	18
3.5.1.3. Knochenbildung (Osteogenese)	19
3.5.2. Knochenstoffwechsel	19
3.5.2.1. Calcium- und Phosphathaushalt	20
3.5.2.2. Parathormon (PTH)	20
3.5.2.3. Calcitonin (CT)	21
3.5.2.4. Vitamin D	21
3.5.3. Knorpel	23
3.5.3.1. Knorpelzellen und Gewebe	23
3.5.4. Nachweismethoden Knochen- und Knorpelstoffwechsel	23
3.5.4.1. Periphere quantitative Computertomographie (pQCT)	24
3.5.4.2. Knochenmarker	25
3.5.4.2.1. Marker der Knochenformation	26
3.5.4.2.2. Marker der Knochenresorption	27
3.5.4.3. Knorpelmarker	27
3.5.4.3.1. Marker der Knorpelformation	28
3.5.4.3.2. Marker der Knorpelresorption	28
3.5.5. Einfluss von Bewegung auf Knochen und Knorpel	29
3.5.5.1. Mechanotransduktion	30
3.5.5.2. Lokalisation der durch Bewegung verursachten Veränderungen	31
3.5.5.3. Art, Intensität und Frequenz der Bewegung	33
3.5.5.4. Ernährung und Bewegungsapparat	35
3.5.5.5. Knorpel und Bewegung	35

3.6. Stoffwechsel und Energiehaushalt von Schaf und Ziege .....	39
3.6.1. Besonderheiten im Wiederkäuer Stoffwechsel.....	39
3.6.2. Metaboliten des Stoffwechsels .....	42
3.6.2.1. Glucose.....	42
3.6.2.2. $\beta$ -Hydroxybutyrat (BHB) .....	42
3.6.2.3. Lactat .....	43
3.6.2.4. Harnstoff (Urea).....	44
3.6.3. Energie und Protein: Bedarf und Deckung .....	44
3.6.4. Besonderheiten der Alpweidung und deren Einfluss auf den Energiestoffwechsel .....	46
3.6.4.1. Energetischer Mehrbedarf durch vermehrte Bewegung.....	46
3.6.4.2. Hypoxie.....	47
3.6.4.3. Extreme Klimabedingungen .....	48
3.6.4.4. Futter auf der Alp: Aufnahme und Verwertung .....	49
<b>4. Tiere, Material und Methoden .....</b>	<b>50</b>
4.1. Versuchstiere .....	50
4.2. Haltung und Geländebeschreibung .....	50
4.3. Futter und Fütterung .....	53
4.4. Versuchsanordnung.....	53
4.5. GPS Daten und Auswertung .....	54
4.6. Knochendichtemessung mittels peripherer quantitativer Computertomographie .....	55
4.7. Blutentnahme und Analyse.....	56
4.7.1. Blutentnahme.....	56
4.7.2. Analyse der verschiedenen Blutparameter .....	56
4.7.2.1. Bestimmung von Calcium (Ca), Phosphor (P) und Magnesium (Mg) .....	56
4.7.2.2. Bestimmung der knochenspezifischen alkalischen Phosphatase (bAP).....	56
4.7.2.3. Bestimmung des Osteocalcin (OC) .....	57
4.7.2.4. Bestimmung der Serum-Crosslaps (SCL) .....	57
4.7.2.5. Bestimmung des 1.25(OH) <sub>2</sub> -Vitamin D (1.25 Vit D) .....	57
4.7.2.6. Bestimmung des 25-Hydroxy Vitamin D (25-OH Vit D).....	58
4.7.2.7. Bestimmung des Prokollagen-II-Propeptid (CP-II) .....	58
4.7.2.8. Bestimmung des carboxyterminalen Telopeptid-Fragment des Typ-II-Kollagens (CTX-II)....	58
4.7.2.9. Bestimmung von Glukose, $\beta$ -Hydroxybutyrat (BHB), Lactat und Urea .....	59
4.8. Kotprobenentnahme und Analyse .....	59
4.9. Pflanzenprobenentnahme und Analyse.....	60
4.10. Klimadaten .....	60
4.11. Statistische Methoden .....	60
<b>5. Ergebnisse .....</b>	<b>61</b>
5.1. Allgemeines .....	61
5.2. Gewichtsentwicklung .....	61
5.3. GPS-Datenerhebung .....	61
5.3.1. Aufenthaltsgebiete der Tiere .....	65
5.4. pQCT-Messungen .....	74
5.4.1. Messung der Knochendichte (BMD).....	74
5.4.1.1. Gesamtknochendichte an Dia- und Epiphyse .....	74
5.4.1.2. Trabekuläre und cortikale BMD .....	75
5.4.2. Messung der Knochenmasse (BMC).....	76
5.4.2.1. Gesamtknochenmasse an Dia- und Epiphyse .....	76

5.4.2.2. Trabekulärer und cortikaler BMC.....	77
5.4.3. Messung des Knochendurchmessers .....	78
5.4.3.1. Messung des Gesamtknochendurchmessers .....	78
5.4.3.2. Messung des cortikalen Durchmessers.....	79
5.5. Blutwerte.....	80
5.5.1. Mineralstoffe (Calcium, Phosphor, Magnesium) .....	80
5.5.2. 1.25(OH) <sub>2</sub> -Vitamin D und 25-Hydroxy Vitamin D.....	81
5.5.3. Knochenmarker .....	82
5.5.3.1. Knochenspezifische Alkalische Phosphatase (Knochenformation) .....	82
5.5.3.2. Osteocalcin (Knochenformation) .....	83
5.5.3.3. Serum-Crosslaps (Knochenresorption) .....	84
5.5.3.4. Knochenindex .....	84
5.5.4. Knorpelmarker .....	85
5.5.4.1. CP-II (Knorpelformation).....	85
5.5.4.2. CTX-II (Knorpelresorption) .....	86
5.5.4.3. Knorpelindex.....	87
5.5.5. Parameter des Energiestoffwechsels im Blut.....	87
5.5.5.1. Glucose.....	87
5.5.5.2. Lactat .....	88
5.5.5.3. $\beta$ -Hydroxybutyrat .....	88
5.5.5.4. Urea .....	89
5.6. Kotanalyse .....	89
5.7. Futterpflanzenanalyse .....	90
5.8. Klima .....	93
<b>6. Diskussion</b> .....	<b>94</b>
6.1. Weide- und Bewegungsverhalten.....	94
6.1.1. Ökologische Aspekte .....	97
6.1.2. Eignung und Messgenauigkeit der GPS Empfänger.....	98
6.2. Knochen, Knorpel und Mineralstoffwechsel .....	99
6.2.1. pQCT Messungen.....	99
6.2.2. Parameter des Knochen- und Knorpelstoffwechsels im Blut .....	105
6.2.2.1. Mineralstoffe (Calcium, Phosphor, Magnesium) .....	105
6.2.2.2. Vitamin D .....	106
6.2.2.3. Knochenmarker (bAP, OC, CTX) und Knochenindex (OC / CTX) .....	108
6.2.2.4. Knorpelmarker (CP-II und CTX-II) und Knorpelindex (CP-II / CTX-II).....	110
6.3. Energiestoffwechsel.....	112
6.3.1. Gewichtsentwicklung .....	112
6.3.2. Parameter des Energiestoffwechsels im Blut (Glucose, Lactat, BHB, Urea).....	114
6.3.3. Energie: Bedarf und Deckung .....	117
6.3.4. Protein: Bedarf und Deckung .....	118
6.4. Schlussfolgerungen und Ausblick.....	120
<b>7. Literaturverzeichnis</b> .....	<b>121</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>137</b>
<b>Curriculum Vitae</b> .....	

## Verzeichnis der Abkürzungen

Abb.	Abbildung
aBMD	areal Bone Mineral Density (g/cm <sup>2</sup> )
ADF	Acid-Detergent Fibre
ADL	Acid-Detergent-Lignin
AK	Antikörper
AP	Alkalische Phosphatase
AS	Aminosäure
bAP	Knochenspezifische Alkalische Phosphatase
BHB	β-Hydroxybutyrat
BMC	Knochenmasse/ Mineralstoffgehalt (Bone Mineral Content (g))
BMD	Knochendichte/ Mineralstoffdichte (Bone Mineral Density)
C2C	Collagenase-generated Cleavage Epitope des Kollagen Typ II
Ca	Calcium
CH	Schweiz
COMP	Cartilage Oligomeric Matrix Protein
CP-II	Carboxy-Propeptid des Typ-II-Kollagens
CTX	Carboxyterminales Serumcrosslap
CTX-II	Carboxyterminales Telopeptid des Typ-II-Kollagens
d	Tag
DE	Verdauliche Energie (Digestible Energy)
DEXA	Dualröntgenabsorptiometrie
DPD	Deoxypyridinolin
DXR	Digitale Radiogrammetrie
ECLIA	Electrochemiluminescence Immunoassay
EIA	Enzymimmunoassay
ELISA	Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
GAG	Glykosaminoglykane
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
h	Stunde
HPLC	High Pressure Liquid Chromatographie
HRP	Meerrettichperoxidase (Horseradish Peroxidase)
HYP	Hydroxyprolin
I-CTP	Carboxyterminales Telopeptid des Typ-I- Kollagens
k.A.	keine Angaben
kcal	Kilocalorie
kJ	Kilojoule (=0.2389 kcal)
kg <sup>0.75</sup>	Metabolisches Körpergewicht
LM	Lebendmasse
m	Meter
Max.	Maximum
ME	Umsetzbare Energie (Metabolizable Energy)
min	Minute
Min.	Minimum
Mg	Magnesium
MJ	Megajoule (=1000 kJ)
N	Stickstoff
NDF	Neutral-Detergent Fibre
NEFA	Non-Esterified Fatty Acids
NEL	Nettoenergie-Laktation
NfE	N-freier Extraktstoff (Nitrogen free Extractives)
NTX	Aminoternales Serumcrosslap
OA	Osteoarthritis
OC	Osteocalcin
oS	Organische Substanz

P	Phosphor
p	Signifikanz
PG	Proteoglykan
pQCT	Periphere Quantitative Computertomographie
PTH	Parathormon
PVit D <sub>2</sub>	Ergocalciferol
PVit D <sub>3</sub>	Cholecalciferol
PYD	Pyridinolin
QCT	Quantitative Computertomographie
QUS	Quantitative Knochenultrasonometrie
Ra	Rohasche
Rfa	Rohfaser
Rfe	Rohfett
RIA	Radioimmunoassay
Rp	Rohprotein
s.	siehe
SCL	Serum-Crosslaps
STE	Standardfehler (Standarderror)
sV	Scheinbare Verdaulichkeit
Tab.	Tabelle
tgl.	Täglich
TMB	Tetramethylbenzidine
TNZ	Thermoneutrale Zone
TS	Trockensubstanz
U	Einheit (Unit)
ü.M.	Über dem Meeresspiegel
UV	Ultraviolett
vBMD	volumetric Bone Mineral Density (g/cm <sup>3</sup> )
VFA	freie flüchtige Fettsäuren (Free Volatile Fatty Acids)
Wo	Woche
Zeitl.	Zeitlich
1.25 Vit D	1.25(OH) <sub>2</sub> -Vitamin D
25-OH Vit D	25-Hydroxy Vitamin D

# 1. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, das Weide- und Bewegungsverhalten von Schaf und Ziege auf der Alp und dessen Einfluss auf den Knochen- und Energiestoffwechsel zu untersuchen.

Jeweils 15 nicht-laktierende Schafe und Ziegen wurden für 3 Monate auf der ETH Forschungsstation Alp Weissenstein gehalten. Die Tiere hatten täglich ca. 11 Stunden uneingeschränkten Zugang zu den verschiedenen Vegetationszonen der Alp, nachts wurden sie eingestallt. Bei den täglichen Weidegängen trugen sechs Tiere jeder Spezies GPS-Empfänger, um so Informationen über die täglich zurückgelegte Wegstrecke und die bevorzugt beweideten Vegetationszonen zu erlangen. Von allen Tieren wurde regelmässig Blut entnommen, das Gewicht kontrolliert und die Knochendichte gemessen. Zusätzlich wurden auf der Alp Futter- und Kotproben gesammelt.

Die Schafe zogen vor allem in höhere Gebiete mit alpinem Rasen, während die Ziegen sich hauptsächlich in den tiefer gelegenen Zwergstrauchgesellschaften aufhielten. Die Schafe legten dabei im Vergleich zu den Ziegen weitere Strecken und mehr Höhenmeter zurück. Nach einer gewissen Anpassungszeit deckten die Tiere mit der vorhandenen alpinen Flora ihren Energiebedarf. Die vermehrte Bewegung führte an der Diaphyse zu einer Zunahme der kortikalen Dicke, an der Epiphyse kam es zusätzlich zu einer Zunahme des Gesamtknochendurchmessers. Diese Veränderungen im Knochen führten zu einer Zunahme der Knochenmasse. Bei den Schafen nahm auch die totale vBMD zu.

## 2. Summary

The aim of this study was to evaluate whether behavioural differences in feeding and physical activity in a large mountainous area influence bone and energy metabolism in freely ranging goats and sheep. For three months 15 ewes and 15 goats, all non-lactating, were grazed on the area of the ETH research station Alp Weissenstein. The animals were allowed free range grazing during the day and were returned to the stable at night. During daytime they had approximately 11 hours of free access to different vegetation zones on the pastures. Six animals of each species were equipped with a GPS receiver in order to calculate daily tracks and receive information on preferred botanical patterns. On a regular basis blood sampling and weighing took place. Bone mineral density was also measured. During the animals' sojourn in the high altitude area food and faecal samples were collected.

Sheep grazed mainly in higher elevation alpine grass areas, whereas goats preferred the lower dwarf-shrub communities. Therefore the sheep walked further distances and ascended higher than the goats. After an adaptation period both species were able to meet their energy requirements with the local alpine flora.

Increased motility resulted in a thicker cortical diameter and a larger epiphyseal cross sectional bone area. Due to these enhanced sizes, the bone mineral content increased. In sheep the total vBMD also increased.



### **3. Einleitung**

#### **3.1. Ziel der Arbeit**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, das unterschiedliche Weide- und Bewegungsverhalten von Ziegen (eher "Browsertyp") und Schafen ("Grazertyp") bei Alpweidung (2000 m ü.M.) zu beobachten, und den Einfluss der unterschiedlichen Bewegungsintensität bei der Futtersuche auf den Knochenstoffwechsel bei den beiden Tierarten vergleichend zu untersuchen.

Darüber hinaus sollte festgestellt werden, ob es den Tieren möglich ist, den erhöhten Energiebedarf, der durch Bewegung bei der Futtersuche in Bergregionen entsteht, mit der vorhandenen alpinen Flora zu decken.

#### **3.2. Alpung von Schafen und Ziegen**

Die landwirtschaftliche Nutzung der Alpen ist eine jahrtausendealte Tradition in der Schweiz. Da in den Alpen Ackerbau oft nicht möglich oder rentabel ist, hat die Viehwirtschaft eine herausragende Bedeutung (Bätzing, 2003).

Die 6000 km<sup>2</sup> Alpweidegebiet der Schweiz werden im Sommer mit über 300.000 Grossvieheinheiten genutzt. Neben Rindern und Pferden spielt vor allem die Alpung von Schafen eine Rolle. So hat sich in der Schweiz die Anzahl der Schafe seit den 50er Jahren mehr als verdoppelt. Mehr als die Hälfte der 421.000 Schafe werden jährlich in den Alpen gesömmert. Zwei Drittel der 20.000 schafhaltenden Betriebe liegen in Berggebieten. Aber auch die Ziegenhaltung, als wichtige Nischenproduktion, nimmt an Bedeutung zu. Ziegenkäse und -milch erfreuen sich immer grösserer Beliebtheit und es besteht ein guter Absatzmarkt für diese Produkte (Loretz, 2003). Momentan gibt es 62.000 Ziegen in der Schweiz, die sich auf 11.000 Halter verteilen.

Beide Tierarten werden häufig zur Landschaftspflege eingesetzt. Im Gegensatz zum Rind sind Schaf und Ziege bessere Kletterer und eignen sich daher auch für die Beweidung von steilen Hängen. Gerade Schafe können sich gut an die extremen Bedingungen der Alpen anpassen. Sie können viel länger als Rinder und Ziegen ohne Wasser auskommen, und die Wolle stellt einen hervorragenden Schutz gegen raue Witterungen dar. Da Schafe auch gefrorene Pflanzen fressen, ist es ihnen selbst bei längeren Perioden mit Schnee noch möglich, genügend Nahrung zu finden.

Allerdings weiden Schafe sehr selektiv und dazu noch bevorzugt in geologisch und botanisch besonders empfindlichen Gebieten. Der Verbiss der Pflanzen knapp über dem Boden kann in steilem Gelände, wo es nur wenig Vegetation gibt, zu Erosionen führen.

Ziegen weiden ebenfalls sehr selektiv, ihr schmales Maul mit der gespaltenen und gut beweglichen Oberlippe ermöglicht ihnen gezieltes Greifen von einzelnen Pflanzenteilen.

Auch bewehrte Pflanzen, wie Disteln und dornenbesetzte Sträucher werden gefressen. Daher werden Ziegen häufig gezielt eingesetzt, um einer Verbuschung entgegen zu wirken. Zugute kommen ihnen hierbei auch ihre exzellenten Kletter- und Sprungfähigkeiten. Diese ermöglichen ihnen auch schwer zugängliche Nahrungsquellen zu erreichen. Pflanzen mit hohem Rohfasergehalt werden gerne genommen, beim sogenannten Ringeln wird zirkulär die komplette Rinde eines Astes oder Stammes abgenagt. Bäume und Sträucher, die erhalten bleiben sollen, müssen daher umzäunt werden. Gleiches gilt auch für Schafe, die zwar nicht in solchem Ausmass Geäst fressen wie Ziegen, allerdings auch erhebliche Verbissschäden verursachen können.

Sowohl für die Schaf- als auch Ziegenhaltung gilt, dass für eine nachhaltige landwirtschaftliche Nutzung der Alp ein gut geplantes Weidemanagement entscheidend ist. Hierbei entscheidende Faktoren sind Anzahl der Tiere, die Dauer, der Beginn- und Endzeitpunkt der Bestossung und die Abtrennung bzw. das Einzäunen ungeeigneter Gebiete und Vegetation (Stadler und Wiedmer, 1999). Bei einer angepassten Viehdichte und angemessener Beweidung, kann es durch Schafe und Ziegen sogar zu einer gesteigerten Artenvielfalt der Flora mit erhöhtem Futterwert und Festigung der Grasnarbe kommen (Bätzing, 2003).

### 3.3. Gebietsbeschreibung der Alp Weissenstein (Crap Alv)

#### 3.3.1. Geographische Lage



**Abb. 1:** Lage des Albulapasses nach Schmid, 2007. Übersichtskarte Schweiz, swisstopo (Wabern, 2004)

Die Alp Weissenstein befindet sich am Albulapass (Pass d'Alvra) im Kanton Graubünden. Die Alp umfasst ein 434 ha grosses Gebiet, welches sich in verschiedenen nutzbare Weide-

und Wiesenflächen gliedert. Neben diesem landwirtschaftlich nutzbaren Gebiet umfasst das Gelände viel Felsareal (Gipfel, Kreten, abfallende Felswände mit Terrassen, Riffe), Gehängeschutt und Moränenmaterial (Kuppen, Mulden, Wälle). Das als Weidegebiet genutzte Gebiet erstreckt sich zwischen einer Höhe von 1900 bis 2600 m ü.M. und befindet sich damit in der subalpinen und alpinen Höhenstufe. Die ETH Forschungsstation (781.000 / 161.650 Schweizer Landeskoordinaten in m) mit den Stallgebäuden liegt auf einer Höhe von 2026 m ü.M. am Südwest-Hang des Igl Compass (3016 m ü.M.). Abbildung 1 zeigt eine geographische Übersichtskarte der Schweiz und Abbildung 2 eine geographische Karte der Alp Weissenstein.

### **3.3.2. Klima**

Plötzliche Wetterumschwünge mit extremen Witterungssituationen sind typisch für alpine Gebiete. Mit zunehmender Höhe sinken Luftdruck, Sauerstoffpartialdruck, Luftdichte, Temperatur (alle 100 Höhenmeter fällt die Temperatur um 0.5°C), Wasserdampfdruck und Strahlungstemperatur. Starke Sonneneinstrahlung und die klare Bergluft führen zu einer erhöhten UV-Strahlung. Pro Höhenkilometer nimmt die UV-A Strahlung um 11% und die UV-B Strahlung um 19% zu (Blumthaler et al., 1992). Die UV-B Strahlung unterliegt saisonalen Schwankungen mit einem Maximum im Sommer, während die Strahlungsintensität von UV-A das ganze Jahr über etwa gleich bleibt.

Das Gebiet der Alp Weissenstein befindet sich in den Zentralalpen und liegt damit in der kontinentalen Klimazone. In diesen Gebieten kommt es bei starker Sonneneinstrahlung nur zu geringen Jahresniederschlägen. Diese betrugen nach Kirchhofer (1982-2000) zwischen 1100 und 1400 mm. Grosse jahres-, wie auch tageszeitliche Temperaturschwankungen sind ebenfalls typisch. Auch mitten im Sommer kann es zu extremen Temperatureinbrüchen mit Frost und Schneefall kommen. Durch die starke Sonneneinstrahlung schmilzt der Schnee allerdings immer wieder schnell. Hänge mit Südexposition sind von November bis April mit Schnee bedeckt, während Hänge mit Nordexposition schon von Oktober bis Juni zugeschneit sein können.

### **3.3.3. Geologie und Böden**

An den Wohn- und Stallgebäuden der Alp Weissenstein treffen drei tektonisch verschiedene Gesteinsdecken aufeinander: zum einen die Errdecke mit Albulagranit, die Berninadecke mit Mischgestein und dann noch die fast das gesamte Gebiet der Crap Alv bildende Eladecke mit karbonatreichen Sedimenten aus Allgäuschiefer (Kalkschiefer) und Dolomit. Demnach kommen im Untersuchungsgebiet sehr viele „kalkanzeigende“ Pflanzen vor.



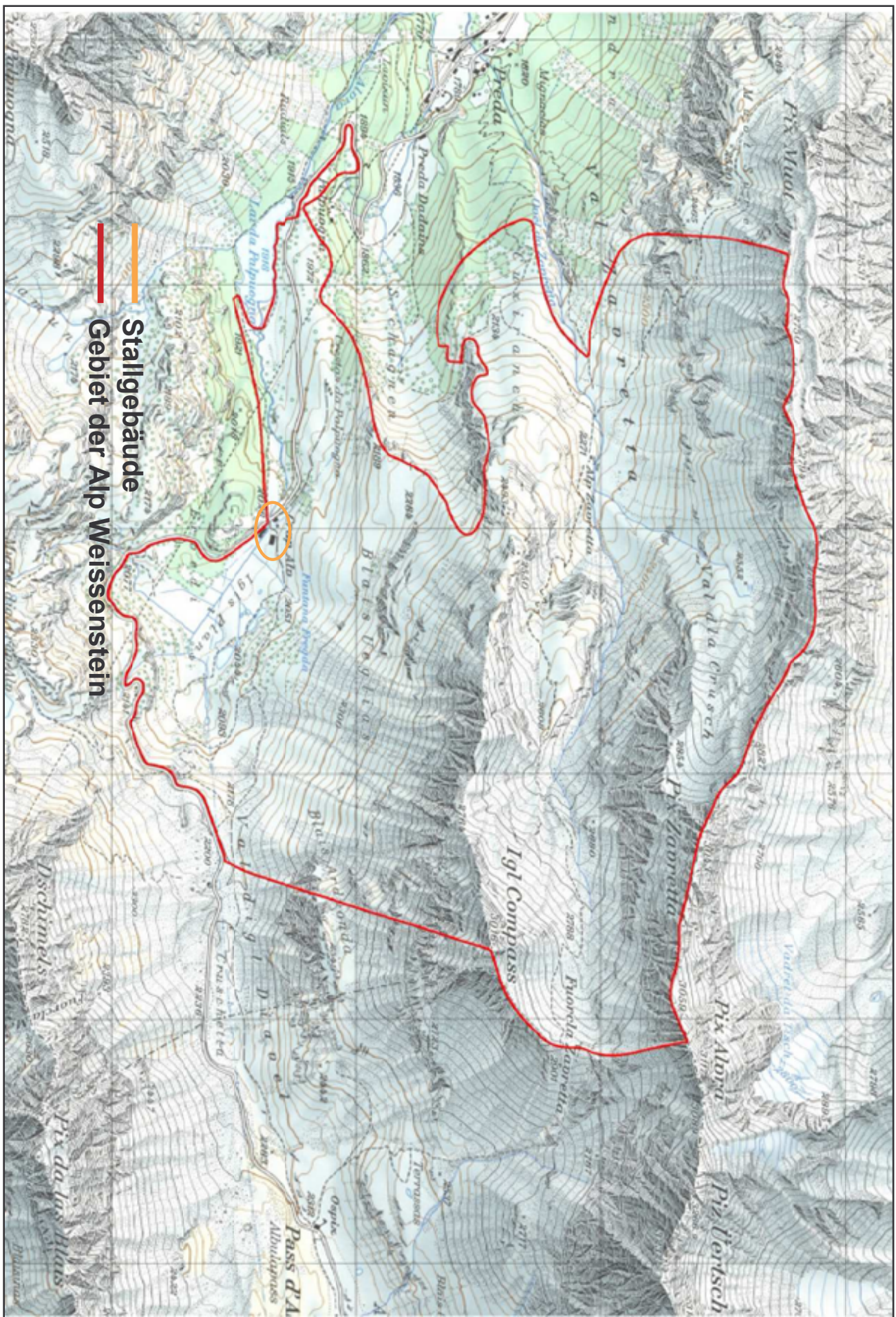


Abb. 2: Geographische Karte der Alp Weissenstein, swisstopo (Wabern, 2000)



### 3.3.4. Alpine Flora

Trotz extremen klimatischen Bedingungen, denen Pflanzen im Gebirge ausgesetzt sind, findet sich im Hochgebirge eine erstaunlich grosse Artenvielfalt. So umfasst die Pflanzenwelt der Alpen 5000 Arten, das entspricht  $\frac{3}{7}$  der gesamten europäischen Flora.

Die vorhandene Vegetation wird massgeblich über die Höhenstufe bestimmt. Mit zunehmender Höhe nehmen sowohl die Artenvielfalt als später auch die Pflanzengrösse ab, während der Standortstress zunimmt (Schmid, 2007). Stress kann sowohl durch abiotische wie auch biotische Faktoren entstehen. Diese Faktoren umfassen z.B. tiefe Temperaturen, Wind, Frost, niedriger Luftdruck, Licht- und Nährstoffmangel, Beweidung, Tritt- und Erosionsschäden. Es besteht ein negativer Zusammenhang zwischen dem standörtlichen Stress und der funktionellen Diversität (Schmid, 2007).

Je nach Höhenstufe lässt sich eine unterschiedliche Vegetation beschreiben. In den Zentralalpen auf der subalpinen Stufe (ca. 1400–2200 m ü.M.) dominieren die Bergwälder. Der Beginn der alpinen Stufe (2200–2800 m ü.M.) ist durch die natürliche Wald- und Baumgrenze gekennzeichnet, darüber wird an mindestens 100 Tagen im Jahr eine mittlere Temperatur von 5°C nicht überschritten (Reisigl und Keller, 1994). Auf dieser Stufe befinden sich im unteren Bereich überwiegend Kleinsträucher und alpiner Rasen im oberen Bereich (Burga et al., 2004). Es folgt die subnivale Stufe mit Flachpolstern, die in die fast vegetationslose nivale Stufe (ab 2800 m ü.M.) übergeht. Auch auf der Alp Weissenstein finden sich in den verschiedenen Höhenstufen die dafür typischen Pflanzengesellschaften.

Bedingt durch die Höhe haben die Pflanzen eine wesentlich kürzere Vegetationsdauer (-1 Woche / 100 m). Auf 2000 m ü.M. beträgt diese 4.5 Monate, während sie sich auf 3000 m ü.M. auf 1-3 Monate verkürzt. Die Wachstumsphase endet oft schon im August.

#### 3.3.4.1. Pflanzengesellschaften der Crap Alv

Die Vegetation von Alpweiden hat sich durch eine lang anhaltende landwirtschaftliche Nutzung verändert. Ein Strukturwandel in der Alpwirtschaft im 19. und 20. Jahrhundert führte zu teils beachtlichen ökologischen Veränderungen im Alpraum. Intensiv genutzte kleine Teilgebiete wurden durch Übernutzung ökologisch völlig entwertet, während andere Gebiete wegen Nutzungsaufgabe grossflächig verbuschen oder sogar verwalden (Bätzing, 2003). In beiden Fällen kommt es zur Abnahme der Artenvielfalt und der funktionellen Diversität.

Durch Beweidung mit verschiedenen Tierarten wird die Pflanzenwelt unterschiedlich beeinflusst, und auch im Gebiet der Crap Alv spiegeln sich die Folgen der Bestossung in den einzelnen Vegetationsmosaiken wider (Keller, 2006). So werden z.B. steile Hänge weniger genutzt, und es befinden sich dort in oberen Bezirken überwiegend Rasengesell-



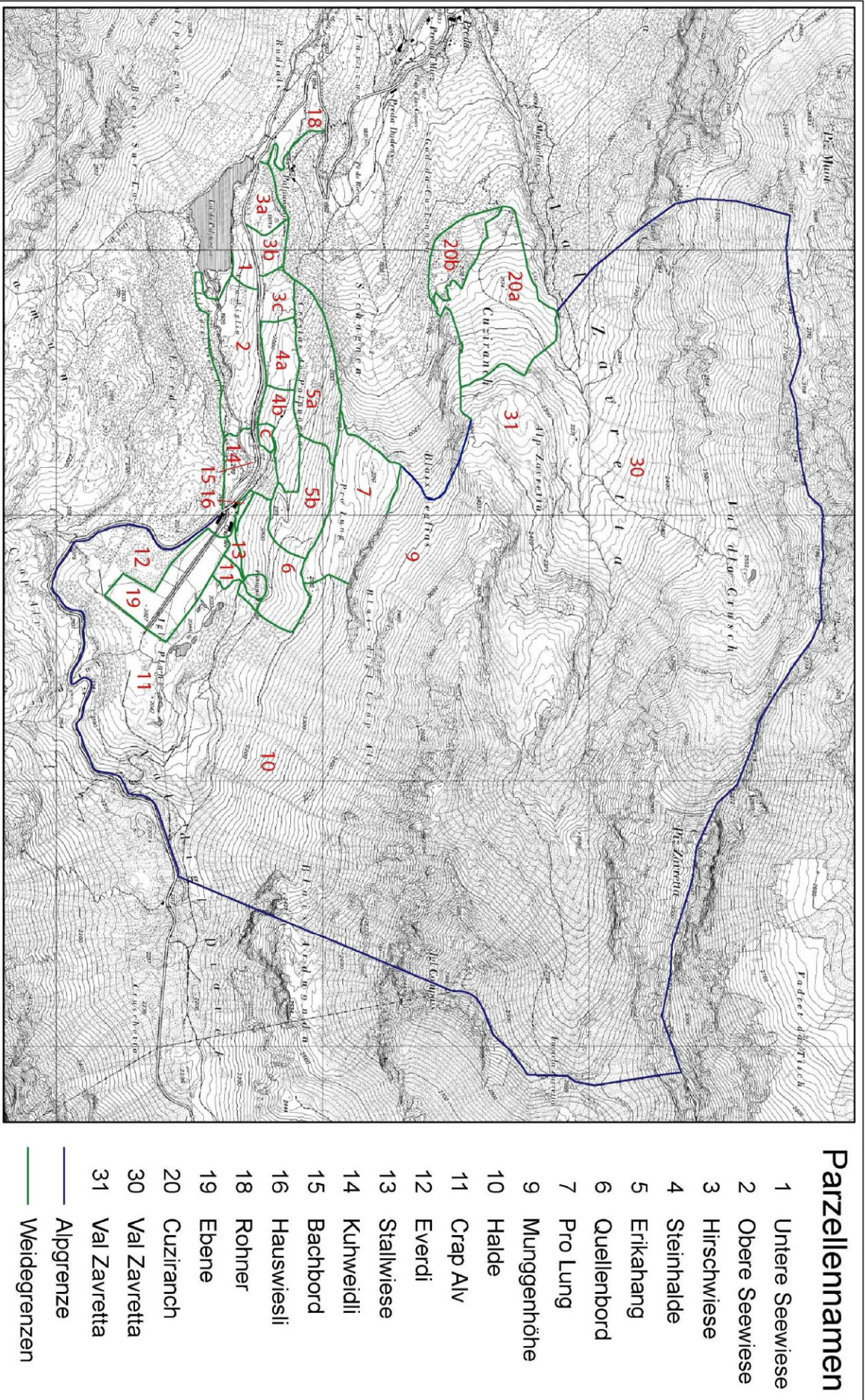


Abb. 3: Parzellennamen der Alp Weissenstein aus Keller 2006



schaften und in den unteren Abschnitten Zwergstrauchheiden (Jewell, 2002). Je nach Heterogenität der Störungs- und Nährstoffverteilung entstehen so unterschiedliche Vegetationstypen mit verschiedenen Pflanzengesellschaften (Jewell, 2002).

Das Gebiet der Alp Weissenstein beheimatet ca. 500 verschiedene Pflanzenarten, die ca. 32 verschiedene Vegetationstypen bilden (Schmid, mündliche Mitteilung). Je nach Relief, Witterungsexposition, Nutzungsintensität und vorkommenden Pflanzenbeständen kann das Weidegebiet der Alp Weissenstein grob in fünf Bereiche gegliedert werden (siehe Abb. 3).

Die Weiden im unteren flachen Bereich (Parzelle 1-4, 11, 13-16, 18) sind hauptsächlich futterbaulich wertvolle alpine Fettweiden.

Im Nebental, Val Zavretta (Parzelle 30, 31), sind die Weiden dagegen mit zahlreichen Steinen und Felsbrocken übersät und häufig von Schuttfächern durchzogen. Die steileren Bereiche bestehen überwiegend aus Grasheiden, während die ebeneren Flächen aus mageren Fettweiden bestehen.

Das im Westen anschliessende Weidegebiet der Cuziranch (Parzelle 20) hat eine in der Zusammensetzung variierende Vegetation. In den kargen Magerweiden wachsen viele Zwergsträucher, die aber immer wieder von Raseninseln durchsetzt werden. Weiter bergab in Richtung Preda folgen die ersten Bäume im Übergang zur Waldweide.

Der obere Bereich des Haupttals, die Munggenhöhe (Parzelle 9), zeichnet sich durch starke Neigung mit Magerweiden aus. Das Futterangebot ist hier nicht sehr ergiebig. Weiter unten im Anschluss (Parzelle 7) flacht sich das Gelände ab, was zu einer üppigeren Vegetation auf den Magerweiden führt. Auch kommen in diesem Gebiet Zwergstrauchgesellschaften vor. Pro Lung ist die höchst gelegene Weide der Alp Weissenstein, die noch mit Rindern beweidet werden kann. Als unterster Weideabschnitt des Haupttals, zwischen Pro Lung und den Alpgebäuden, befinden sich noch die Parzellen 5 und 6 (Erikahang und Quellenbord). Wie der Name schon sagt, ist dieser recht steile Erikahang grossflächig mit Zwergstrauchbeständen bewachsen und auch im unteren Bereich des Quellenbords dominieren Zwergsträucher, während der obere Teil sowohl durch fette als auch magere Pflanzenbestände besiedelt wird.

Schliesslich ist noch die letzte Weidefläche der Alp, die sogenannte Halde (Parzelle 10), zu erwähnen. Die Grasheiden dieses sehr steilen trockenen Südhangs sind immer wieder von vegetationsarmen Schuttfächern durchzogen.

Neben diesen fünf ausschliesslich als Weidegebiet genutzten Flächen, gibt es noch östlich der Gebäude eine Ebene, die als Heuwiese genutzt wird (Parzelle 19). Auch umfasst das Gebiet einige Waldweiden (Teile von Parzelle 5a, Parzelle 20b und 12), die allerdings bisher noch nicht näher botanisch kartiert wurden.



Für eine genauere Vegetationsbeschreibung mit den einzelnen Pflanzengesellschaften sind die Abbildungen 9 und 10 (Vegetationskarten in 4. Tiere, Material und Methoden) und Tabelle 1 zu betrachten.

**Tab. 1:** Pflanzengesellschaften auf der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)

<b>Gesellschafts- bezeichnung</b>	<b>Assoziationsnamen nach Braun-Blanquet (1948/1949) und Ott et al. (1997)</b>
<b>Felsgesellschaften</b>	Potentilletum-Hieracietum humilis (Fingerkrautfelsflur) Androsacetum helveticae (Mannsschildfelsflur)
<b>Schuttgesellschaften</b>	Petasitetum paradoxi (Pestwurzschuttflur) Thlaspeetum rotundifolii (Täschelkrautschuttflur) Schieferschuttgesellschaften: Oxyrietum digynae (Säuerlingsschuttflur) Androsacetum alpinae (Mannschildschuttflur) Drabeto-Saxifragetum (Felsenblümchenschuttflur)
<b>Alpiner Rasen</b>	Elynetum myosuroidis (Nacktriedrasen) Caricetum firmae (Polsterseggenrasen) Trifolium thalii-Festucetum violaceae (Violettschwingelrasen) Seslerio-Caricetum sempervirentis (Blaugras-Horstseggenrasen)
<b>Schneetälchen- gesellschaften</b>	Salicetum herbaceae (Krautweidenschneetälchen) Salicetum retuso-reticulatae (Netzweidenschneetälchen)
<b>Subalpiner Rasen</b>	Alchemillo-Poetum supinae (Lägerispengrasrasen) Deschampsia cespitosa-Poetum alpinae (Rasenschmielenrasen) Crepido aurea-Festucetum rubrae fette Ausbildung (fette Milchkrautweide) Crepido aurea-Festucetum rubrae magere Ausbildung (magere Milchkrautweide) Geo montani-Nardetum (Borstgrasrasen) Caricetum ferrugineae (Rostseggenrasen)
<b>Hochstaudenfluren</b>	Adenostylo-Cicerbitetum (Alpendosthochstaudenflur)
<b>Feuchtgebiets- gesellschaften</b>	Caricetum davallianae (Davallenseggenried) Caricetum fuscae (Braunseggenried) Caricetum rostratae (Schnabelseggenried) Eriophoretum scheuchzeri (Wollgrasried) Cratoneureto-Arabidetum bellidifoliae (Gänsekressenquellflur)
<b>Zwergstrauch- gesellschaften</b>	Junipero-Arctostaphyletum juniperetosum (wacholderreiche Zwergwacholderheide) Junipero-Arctostaphyletum callunetosum (besenheidenreiche Zwergwacholderheide) Rhododendro ferruginei-Vaccinietum (Alpenrosenheide)
<b>Wald- und Buschgesellschaften</b>	Larici-Pinetum cembrae typicum (Lärchen-Arvenwald mit Alpenrose) Rhododendro ferruginei-Pinetum montanae (Alpenrosen- Bergföhrenwald) Sphagno-Pinetum montanae (Torfmoos-Bergföhrenwald) Erico-Pinetum montanae (Legföhrengebüsch) Alnetum viridis (Grünerlenggebüsch)
<b>Mischgesellschaften</b>	Mischformen der oben genannten Gesellschaften

### 3.3.4.2. Futterwert und Futtermittelanalyse

Der Futterwert ist ein zusammenfassender Ausdruck für die energetische Bewertung, den Nährstoffgehalt und die diätetischen und verzehrsbestimmenden Eigenschaften eines Futtermittels. Nach Klapp (1965) wird er in Zahlen von -1 (giftig) bis 7 (sehr hoher Futterwert) eingeteilt. Der Futterwert ist abhängig von der Feuchtigkeit und dem Nährstoffgehalt des Standortes. In feuchten Zonen kommt es zu einem gesteigerten Pflanzenwachstum, daher steigt in diesen Gebieten auch der Futterwert an. Gleiches gilt für nährstoffreiche Standorte, hier besteht ebenfalls eine positive Korrelation zum Futterwert (Keller, 2006). Beispielsweise kann eine typische Weidelgrasweide einen Futterwert von 7.2 erreichen (Klapp, 1965). Ab einem Futterwert von 2 sind Tiere mit geringen Futteransprüchen, wie Schaf und Ziege, in der Lage mittels Selektion ihren Erhaltungsbedarf zu decken (Spatz, 1994).

Die verschiedenen Pflanzengesellschaften der Alp Weissenstein weisen stark unterschiedliche Futterwerte auf. Bei einer Untersuchung der Weidegesellschaften von Keller im Jahre 2006 war der höchste Wert mit 5.66 in einer Fettweide mit Lägerrispengras zu finden. Den geringsten Futterwert (0.99) wies die besenheidereiche Zwergstrauchheide auf. Durchschnittlich wiesen die Alpweiden der Crap Alv eine Futterwertzahl von 3.63 auf. Eine genaue Analyse der Futtermittel erfolgt nach dem Weender System (Kirchgeßner, 2004). Durch dieses standardisierte Analysesystem wird eine Einteilung der Nährstoffe in Rohasche, Rohprotein, Rohfett, N-freie Extraktstoffe und Rohfaser erreicht. Für eine bessere Differenzierung der Kohlenhydrate kann die Weender Analyse durch die Analysemethode nach van Soest (1991) ergänzt werden. Hierbei werden nach Kochen in neutraler Detergentienlösung die Summe sämtlicher unlöslicher und löslicher Gerüstsubstanzen (NDF, Neutral Detergent Fiber) freigesetzt. Nach Kochen in schwefelsaurer Detergentienlösung bleiben im wesentlichen Cellulose und Lignin übrig (ADF, Acid Detergent Fiber). Eine Zugabe von 72%iger Schwefelsäure hydrolysiert die Cellulose und der verbleibende Rückstand wird als Lignin ausgewiesen (ADL, Acid Detergent Lignin). Die Verdaulichkeit und damit auch der Futterwert nehmen dabei mit der Menge von den NDF zu ADL ab (Kirchgeßner, 2004).

## 3.4. Ethologie von Schaf und Ziege

### 3.4.1. Nahrungsaufnahmeverhalten („Grazer“ / „Browser“)

Die Bezeichnung „Grazer“ und „Browser“ werden verwendet um Tiere in bestimmte Fressstypen einzuteilen (siehe Abb. 4). Ziegen sind Intermediärtypen, werden aber auch oft den „Browsern“ zugeordnet. Schafe dagegen werden zu den „Grazern“ gezählt (von Korn et al., 2007).

In Relation zur botanischen Assoziation umfasst die bevorzugte Nahrung der „Browser“ Kräuter, Stauden, Blätter und Zweige verholzter Pflanzen. „Grazer“ dagegen ernähren sich hauptsächlich von Gräsern und teils auch Kräutern. Der Fressstyp sagt allerdings nichts über das Selektionsverhalten bei der Nahrungsaufnahme aus. Es gibt sowohl sehr selektiv weidende „Grazer“ als auch „Browser“.

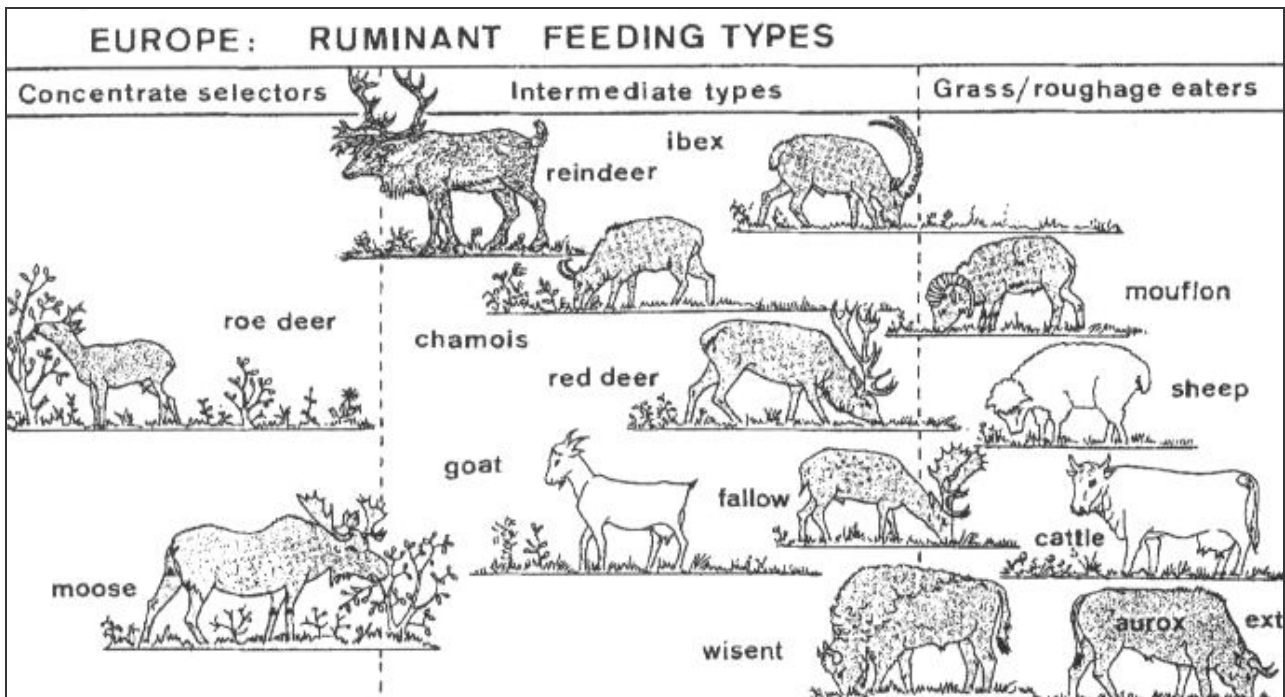


Abb. 4: Verschiedene Wiederkäuerarten und ihre Stellung im System der Ernährungstypen (modifiziert nach Hofmann 1989)

Die Vorgänger der Hausziegen, die Bezoarziegen (*Capra aegagrus*) stammen aus bergigen Gebieten des mittleren Ostens, wo sie in Höhen von bis über 1500 m ü.M. lebten. Die Gegenden dort sind gekennzeichnet durch ein karges Futterangebot und extreme Klimawechsel. Diese Bedingungen führten speziell im Bereich der Nahrungsaufnahme zu einer hohen Anpassungsfähigkeit der Ziege. Bedingt durch die kurzen Vegetationszeiten der Hochgebirge stand den Tieren nur für eine kurze Zeit im Jahr frisches Grünfutter zur Verfügung. Um auch in anderen Jahreszeiten genügend Nahrung zu finden, blieb den Ziegen nichts anderes übrig, als in diesen Zeiten die Ernährung auf Blätter und Zweige von immergrünen Pflanzen, junge Zweige, Rinde und abgestorbene Vegetation umzustellen (Gall, 2001). So kann die Ziege je nach Jahreszeit und gegebenem Futterangebot entweder als Raufutter-, Weichfutter-, oder Konzentratfutterfresser eingeordnet werden (Gall, 2001). Die Ziege nimmt somit im Bezug auf den Fressstyp eine intermediäre Stellung ein. Aufgrund einer grossen Vorliebe für Buschfrass werden Ziegen allerdings oft zu den „Browsern“ gezählt. So kann der „Browse-Anteil“ 45-67% der Gesamtfuttermenge ausmachen (Gall, 2001).

Beim Fressen stellen sich Ziegen erstaunlich kreativ und geschickt an. Durch die fakultative Bipedie, das Stehen auf den Hinterbeinen, kann die Ziege Vegetation bis zu

einer Höhe von 2 m erreichen und durch Abnagen der Rinde erheblichen Schaden an dem Gehölz anrichten. Auch beim normalen Weiden kann die Grasnarbe verletzt werden, so dass offene Bodenstellen entstehen. Die spezielle Anatomie ihres Mauls ermöglicht der Ziege gezieltes Greifen von einzelnen Blättern, Blüten oder Früchten. Dank der gut beweglichen und gespaltenen Oberlippe können auch stachelige Pflanzen gegriffen und gefressen werden, ohne dass sich die Tiere verletzen (Gall, 2001).

Ziegen haben ein grösseres Futterspektrum als andere landwirtschaftliche Nutztiere. Bei grossem Angebot neigen die Tiere allerdings wie Schafe zum selektiven Weiden. Besteht dagegen nur ein geringes Angebot, wird bis auf Giftpflanzen fast alles gefressen (Gall, 2001). So werden bei üppiger Vegetation gerne einmal nur die zarten Pflanzenspitzen oder Blütenstände gefressen. Auch frische Blätter oder gerade abgefallenes Laub sind beliebt. Je älter die Krautschicht desto mehr Laub wird gefressen. Hat die Ziege bei frischem Grünfutter die Wahl, werden Kräuter gegenüber Leguminosen bevorzugt. Diese werden wiederum lieber gefressen als Gräser. Klee wird allerdings stets ungern gefressen. Die Futterauswahl der Ziege erfolgt nach mehreren Kriterien. Hierbei besteht das Grundsatzprinzip, den Nährstoffbedarf mit möglichst wenig Aufwand zu decken. Jungtiere lernen durch Beobachten anderer Herdenmitglieder, welche Pflanzen sie fressen können. Neben der Selektion nach Schmackhaftigkeit sind die Tiere bestrebt, diejenige Vegetation zu fressen, die einen höheren Nährstoffgehalt als die Durchschnittsvegetation besitzt (Gall, 2001). Durch Erfahrung lernen Ziegen, welche Futterzusammensetzung die beste für den Erhalt ihrer Körperfunktionen ist (Gall, 2001; Duncan und Young, 2002).

Ziegen sind tagaktiv und haben einen diurnalen Futteraufnahmehythmus. Der Rhythmus von Fressen, Fermentierung und Wiederkauen wird allerdings nicht nur durch die Tageslichtlänge sondern auch durch die Witterung beeinflusst. So hören die Tiere bei Niederschlag auf zu fressen und stellen sich nach Möglichkeit unter (Gall, 2001). Auch nasses Gras wird nur ungern gefressen (Porzig und Sambras, 1991). Die tägliche Fressdauer und Verzehrsmenge hängen aber auch von der Menge und der Zusammensetzung des Futters ab. Bei einem reichhaltigen Angebot bewegen sich die Tiere möglichst wenig, während bei knappen Futterressourcen oft grosse Anstrengungen unternommen werden, um an beliebte Futterpflanzen zu gelangen.

Schafe weiden ebenfalls sehr selektiv, bevorzugte Pflanzen werden hierbei bis auf die Wurzeln abgefressen (von Korn, 1992). Dieses Weideverhalten kann zu grossen Schäden an der Vegetation führen. Auch Unterbesatz kann zu einem ungleichmässigen Abweiden der Pflanzenstände führen, bei optimaler Bestossung werden von den Schafen allerdings nur wenige Pflanzen komplett verschmält.

Schafe fallen in die Kategorie der „Grazer“, da der Hauptteil ihrer bevorzugten Diät aus Gräsern und Kräutern besteht. Besonders gerne werden eiweissreiche Anteile gefressen; zu diesen zählen junge Triebe, Blütenknospen, junge Kräuter und Leguminosen (Hofer et al., 2002; Rahmann, 2007). Eine Blumenwiese kann innerhalb kürzester Zeit komplett blütenfrei gefressen werden. Besonders problematisch ist diese Blütenselektion bei seltenen Gebirgsblumen und –kräutern, da es hierdurch zu einer Artenverarmung kommen kann. Orchideen ertragen Schafbeweidung besonders schlecht. Bei karger Weide wird auch Laub gefressen; dieser „Browse“-Anteil entspricht bei Schafen aber maximal 20% der Gesamtration (Rahmann, 2007). Sehr unbeliebt sind stark cellulosereiche, bittere oder stechende Pflanzen, Vegetation mit Nadeln und harte Gräser. Diese Abneigung erklärt auch die Entstehung von Wacholderheiden.

Durch Beobachten von älteren Artgenossen lernen Schafe, welche Vegetation sie fressen können; die Vorlieben der Altschafe werden dabei von den Jungschafen übernommen (Hoflund, 1974). Um Wildwuchs von Buschwerk auf Weideflächen zu verhindern, wird daher empfohlen, immer ein paar „Buschfresser“ in der Herde zu behalten, damit sich die jungen Schafe dieses Verhalten anschauen können (Hoflund, 1974).

Auch die Nutzung bestimmter Wanderwege wird von den älteren Schafen übernommen. Selbst nach einer mehrmonatigen Pause werden ohne zu zögern die im Vorjahr benutzten Weideplätze angesteuert (von Wyl et al. 1985). Beim Weidegang zeigen die Tiere ein eigenwilliges Ortsverhalten. Bestimmte Weidenanteile werden bevorzugt, auch wenn diese schon sehr stark abgegrast sind. Schafe halten sich gerne an trockenen Hängen mit Kalkgeröll auf, wo es zur Zerstörung der Pioniervegetation kommen kann. Auch gibt es bevorzugte immer wieder aufgesuchte Ruheplätze (Porzig und Sambras, 1991). Um eine starke Übernutzung einzelner Vegetationsabschnitte zu verhindern, ist ein optimales Weidemanagement entscheidend. Empfindliche Weideabschnitte, die zur Erosion neigen oder seltene Pflanzen beheimaten, sollten daher durch Zäune geschützt werden.

Auch ist auffällig, dass Schafe sich immer in den obersten Abschnitten der Weide aufhalten, dieses Verhalten kann durch die dort wachsende jüngere und schmackhaftere Vegetation erklärt werden. Unabhängig von der Pflanzenart grasen die Tiere nämlich am liebsten dort, wo die Vegetation am niedrigsten ist. Aus demselben Grund werden nach Möglichkeit auch südexponierte sonnige Hänge gemieden, da hier die Vegetation schon weiter im Wachstum ist, als an anderen Stellen, die noch nicht soviel Sonneneinstrahlung bekommen haben (Hofer et al., 2002).

Die Futteraufnahme beim Schaf ist abhängig von der Grösse des Tieres und der Beschaffenheit der Vegetation (Gall, 2001). Auch haben Witterung und Schur einen entscheidenden Einfluss auf die Aufnahmemenge des Futters (da Costa et al., 1992). Im



Gegensatz zur Ziege lassen Schafe sich nicht durch Regen vom Fressen abhalten. Niedrigere Temperaturen oder ein durch die Schur verursachtes erhöhtes Kälteempfinden steigern sogar die Futteraufnahme um 30-60%. Erst bei sehr heftigem Niederschlag unterbrechen auch Schafe die Futteraufnahme, um sich dicht im Pulk als Schutz gegen die Witterung zusammen zu stellen.

### **3.4.2. Bewegungsverhalten**

Ziegen haben ein ausgeprägtes Bewegungsbedürfnis und sind im Gegensatz zu Schaf und Rind wesentlich aktiver (Rahmann, 2000). Sie besitzen ein sehr gutes Sprungvermögen und können bis zu 2 m hoch springen. Daneben sind Ziegen hervorragende Kletterer. Die Eigenschaft erhöhte Gegenstände zu erklimmen, ist schon den „Gitzen“ angeboren. Für die sehr marsch- und kletterfreudige Ziege ist es daher kein Problem auch steile und felsige Hanglagen zu beweiden. Beim Laufen wird harter, trockener und steiniger Boden gegenüber weichem und feuchtem Untergrund bevorzugt. Beim Laufen legen die ausdauernden Tiere teils beachtliche Strecken zurück. So sind Wegstrecken von bis zu 10 km am Tag in ariden Gebieten nichts Ungewöhnliches. In bergigen Gegenden können an einem Tag bei der Futtersuche bis zu 1000 Höhenmetern von den Ziegen überwunden werden (Gall, 2001).

Während Schaflämmer noch viel Zeit mit Spielen, Springen und Klettern verbringen, sind die adulten Tiere weit weniger aktiv. Ab einem Alter von sechs Monaten werden auch die Jungtiere zunehmend phlegmatischer. Die meiste Zeit des Tages wird mit Fressen, Wiederkauen und Ruhen verbracht (Sambraus, 1978). Mit gemächlichem Gang ziehen die Tiere dabei durch die Gegend. Bei der Futtersuche können Schafe Strecken von bis zu 10 km Strecke zurück legen. Zwar sind Schafe nicht ganz so gute Kletterer, bewegen sich aber trotzdem noch sehr geschickt auf unebenem und felsigem Gelände vorwärts. Steile Hänge, die wegen der starken Neigung nicht mehr für Rinder geeignet sind, können immer noch gut als Schafweide genutzt werden.

#### **3.4.2.1. Exkurs: Überwachung des Bewegungsverhaltens**

In der Vergangenheit wurden verschiedene Methoden getestet, um die Bewegungsaktivität von domestizierten Wiederkäuern zu überwachen. Lachica und Aguilera (2005) beschreiben diese Methoden (optische Überwachung, Pedometer, automatische Systeme und GPS) in einem Review-Paper. GPS-Geräte wurden dabei als eine der zuverlässigsten Methoden diskutiert. Roberts et al. (1995) und Rutter et al. (1997) nutzten als erste GPS-Systeme, um Aufschluss über das Weideverhalten von Schafen auf radioaktiv-verseuchten Weiden nach Tschernobyl zu erhalten. Ziel dieser Arbeit war, durch

Bestimmung der „Homeranges“ der Tiere eine Kontamination des Lebensmittels Schaffleisch zu verhindern.

### **3.4.3. Komfortverhalten**

Zum Komfortverhalten zählen Verhaltensweisen, die zur Verbesserung des körperlichen Befindens beitragen (Sambras, 1978). Dieses umfasst den Komplex der Körperpflege, aber auch Verhaltensweisen, die der Thermoregulation dienen.

Die meisten Ziegenrassen haben keine Wolle, daher suchen sie bei nassem und kaltem Wetter wenn möglich geschützte Stellen auf. Trockene Kälte scheint den Tieren bis zu einem gewissen Grad nichts auszumachen. Ziegen sind sehr wasserscheu, bei Regen hören die Tiere auf zu fressen und stellen sich unter (Gall, 2001). Auch zu starke Hitze ist den Tieren unangenehm, sie suchen dann kühle schattige Plätze auf.

Auch Schafe suchen bei heissem Wetter bevorzugt schattigere oder windigere Bereiche wie überhängende Felsen und Gräten auf. Bei schönem warmem Wetter verstreut sich die Herde über ein grösseres Gebiet, während schlechtes Wetter dazu führt, dass die Herde dichter zusammen bleibt. Die Futteraufnahme wird deswegen allerdings nicht unterbrochen.

### **3.4.4. Sozialverhalten (Gruppen-, Erkundungs- und Spielverhalten)**

Ziegen sind sehr soziale in Herden lebende Tiere (Sambras, 1978). Eine Herde umfasst um die 20 Tiere; bis zu einer Anzahl von 100 Tieren können sich die Tiere noch individuell erkennen. Ziegen bilden in diesem Herdensystem eine stabile strikte Rangordnung aus. Bei hornlosen Tieren ist diese Rangordnung recht labil und es kommt immer wieder zu neuen Auseinandersetzungen zwischen den Tieren (Sambras, 1978).

Bei Schafen ist der Herdentrieb noch stärker ausgeprägt als bei Ziegen. Einzeltiere entfernen sich nie weit voneinander und es erfolgt eine ständige visuelle Kontrolle der Herde. Bei hoher Vegetation, unübersichtlichem Gelände oder Dunkelheit erfolgt zusätzlich eine Vokalisierung. Wird eine Schafherde sich selbst überlassen, zerfällt diese in kleine Gruppen von 10-30 Tieren. Bei bis zu 20 Tieren wird dabei eine stabile Rangordnung ausgebildet. Werden Schafe verschiedener Rassen zu einer neuen Herde zusammengebracht, dauert es Monate bis sich die Tiere zusammenfügen (Sambras, 1978). Jede Tiergruppe hat eine gewisse „Home Range“, in der sich die Herde aufhält. Dieses bevorzugte Aufenthaltsgebiet bleibt oft über Jahre hinweg erhalten und auch nach monatelanger Abwesenheit kehren Schafe in diese Gebiete zurück.

Schafe sind sehr scheue Tiere. Unbekanntes wird von ihnen stets argwöhnisch beobachtet, als Zeichen der Erregung stampfen die Tiere mit dem Vorderbein. Erscheint die Gefahrensituation zu bedrohlich, flieht die Herde im Pulk (Bogner und Grauvogl, 1984).



Ziegen dagegen sind äusserst neugierig und erkundungsfreudig. Sie zeigen sehr grosses Interesse daran, was in ihrem Umfeld passiert. Neues wird dabei stets aufmerksam inspiziert. Schon die Ziegenlämmer gehen gerne auf Erkundungstouren, entweder alleine oder mit anderen Lämmern erklettern sie dabei alle erdenklichen Gegenstände.

Sowohl bei Ziegen- als auch Schaflämmern kann eine grosse Anzahl von Spielen, die sich aus den verschiedenen ethologischen Funktionskreisen zusammen setzen, beobachtet werden. Bei den Ziegen spielen nicht nur die Jungtiere untereinander, sondern es werden auch ältere Herdenmitglieder mit einbezogen. Erwachsene Schafe dagegen spielen nicht und gehen auch nicht auf Spielaufforderungen der Lämmer ein.

### **3.5. Knochen- und Knorpelmorphologie: funktionelle Grundlagen**

Knochen ist der wichtigste Bestandteil des Skelettsystems im Körper. Es ist ein spezialisiertes Bindegewebe, welches verschiedene Aufgaben besitzt. Zum einen dient der Knochen den Muskeln als Ansatz und Hebel, daneben hat Knochen eine stützende, schützende und stossdämpfende Funktion im Körper. Neben den mechanischen Eigenschaften kommen noch wichtige metabolische Funktionen hinzu. Das Knochengewebe ist Stätte der Blutbildung und der wichtigste Calciumspeicher im Körper. Durch kontinuierlichen Knochenauf- und -umbau wird der Calciumspiegel im Blut ständig kontrolliert. Dieses sogenannte „Modeling“ und „Remodeling“ des Knochens findet lebenslang statt. Die Vorgänge müssen gut abgestimmt sein, damit eine gleichbleibende Knochenmasse erhalten bleibt. Neben der Aufrechterhaltung der Ca-Homöostase dient das „Remodeling“ der Reparatur von beschädigten Knochenanteilen. Dabei handelt es sich auch um eine Anpassungsreaktion des Gewebes an gesteigerte oder verminderte Belastung (Carter, 1987; Beaupre et al., 1990; Turner und Pavalko, 1998; Liebich, 2004). Pro Jahr werden so ca. 15% der Gesamtknochenmasse umgebaut, wobei trabekulärer Knochen mit 25% die höhere Umbaurate besitzt, kortikaler Knochen dagegen wird jährlich nur zu 3% erneuert (Swaminathan, 2001). Der zyklische Umbauprozess mit Resorption, Formation und Mineralisation dauert etwa drei bis vier Monate.

#### **3.5.1. Aufbau des Knochens**

Knochen ist ein überaus belastbares Gewebe, welches hohen Zug- und Druckbelastungen standhalten kann. Neben der ausgezeichneten Stabilität muss der Knochen zudem gleichzeitig relativ leicht gebaut sein. Diese besonderen Materialeigenschaften werden durch einen kombinierten Aufbau aus einem organischen sowie einem anorganischem Anteil erreicht.

### 3.5.1.1. Knochengrundsubstanz

Die Knochengrundsubstanz besteht aus einem organischen nicht mineralisierten Anteil dem Osteoid und einem anorganischen Teil. Letzterer macht  $\frac{2}{3}$  des totalen Gewichtes der Knochenmasse aus und besteht hauptsächlich aus Hydroxylapatit-Kristallen ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) (Marks et al., 1996). Neben Calcium (ca. 35%) und Phosphat (ca. 50%) kommen noch amorphe Calciumphosphate, Calciumcarbonate und Magnesium-, Natrium- und Kaliumsalze in der Grundsubstanz vor (Liebich, 2004).

Der organische Bestandteil des Knochen setzt sich zu 95% aus Typ I Kollagen zusammen (Junqueira et al. 2002). Neben dem Kollagen enthält er verschiedene Proteoglykane, Lipide, Osteocalcin und Fibronektin. Nicht zur Grundsubstanz, aber ebenfalls zum organischen Anteil des Knochens, gehören die verschiedenen Knochenzellen.

### 3.5.1.2. Knochenzellen

Es gibt vier verschiedene Arten von Knochenzellen. Die Vorläuferzellen sind histologisch undifferenzierte Zellen, die vor allem während des Knochenwachstums aktiv sind. Aber auch im späteren Leben, zum Beispiel bei der Frakturheilung, spielen diese Zellen eine wichtige Rolle.

Aus den Vorläuferzellen gehen die Osteoblasten hervor, aus denen sich wiederum die Osteozyten bilden. Osteoblasten sind für die Synthese der organischen Knochensubstanz zuständig. Sie bilden Kollagen Typ I, Proteoglykane, Mucopolysaccharide und Glykoproteine (Marks et al., 2002). Dabei sezernieren sie knochenspezifische Alkalische Phosphatase (bAP), die lokal zur Mineralisation des Osteoids benötigt wird. Die bAP-Aktivität im Serum kann bestimmt werden, um die Osteoblastenaktivität und damit die Knochenformation abschätzen zu können.

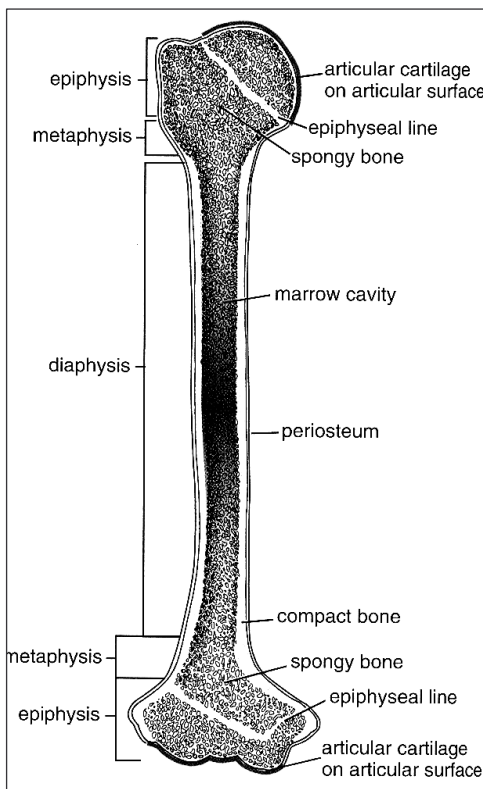
Wenn die Osteoblasten komplett von Osteoid umgeben sind, werden sie als Osteozyten bezeichnet. Diese sind nicht mehr so stark metabolisch aktiv wie die Osteoblasten, tragen aber weiterhin zur Erhaltung der Knochengrundsubstanz bei. In ihrem Cytoplasma können sie Calciumphosphat, was an Proteine und Glycoproteine gebunden ist, konzentrieren, und tragen somit zur Mineralisierung des Osteoids bei. Sterben Osteozyten, kommt es zum Verlust der benachbarten Matrix (Junqueira et al., 2002).

Die Osteoklasten sind für den Abbau der Knochengrundsubstanz zuständig. Ist ihre Anzahl erhöht, deutet dieses auf ein gesteigertes „Bone-Remodeling“ hin. Die Aktivität der Osteoklasten wird hormonell gesteuert. Calcitonin und Östrogene hemmen, Parathormon dagegen fördert indirekt die Aktivität der Osteoklasten (Silbernagel und Despopoulos, 2001). Osteoklasten werden nur in Anwesenheit von Vitamin D aus Monozyten im Knochenmark gebildet (Suda et al., 2003).

### 3.5.1.3. Knochenbildung (Osteogenese)

Es gibt zwei Arten der Knochenbildung. Die desmale Ossifikation führt zur Entstehung des Bindegewebsknochens (z.B. Deckknochen Schädel, Manschette der Röhrenknochen). Hierbei wird mesenchymales Bindegewebe direkt in Knochen umgewandelt. Bei dieser Form der Osteogenese kommt es zu einer frühzeitigen Vaskularisierung, welche die verschiedenen stoffwechselaktiven Aufgaben des Knochens ermöglicht. Diese können dann unmittelbar hormonell gesteuert werden (Liebich, 2004).

Bei der chondralen Ossifikation wird zwischen peri- und enchondraler Ossifikation unterschieden. Hyaliner Knorpel stellt hier die Vorstufe des Knochengewebes dar. Er dient als Platzhalter und stellt bis zum Schluss der Epiphysenfuge eine entscheidende Grundlage für das Längenwachstum des Knochens dar. Bei der perichondralen Ossifikation werden Chondroblasten zu Osteoblasten gewandelt. Diese Umwandlung beginnt mittig am Knorpelmantel der Diaphyse und schreitet mit zunehmender Ossifikation



**Abb. 5:** Aufbau des Knochens nach Ross und Pawlina, 2006

in Richtung der Epiphysen fort. Der so entstehende kompakte knöcherne Mantel (Substantia compacta = Cortikalis) beeinflusst den Stoffwechsel des mittig liegenden Knorpels, dabei kommt es zu einer Hypertrophie und Degeneration der Chondrozyten mit anschließender Verkalkung (Liebich, 2004). Mit einsprossenden Gefäßen gelangen Chondroklasten in das verkalkte Knorpelgewebe und lösen dieses auf. Es folgt die Phase der enchondralen Ossifikation. Unter ständigem Auf- und Umbau des Knochengewebes wird die innere Knochenbälkchenschicht (Substantia spongiosa = Spongiosa), welche das Knochenmark umschliesst, gebildet. Die Umbauvorgänge von Knorpel zu Knochen sind vor allem an der Metaphyse sichtbar. Abbildung 5 stellt die verschiedenen Anteile und den Aufbau des Knochens dar.

### 3.5.2. Knochenstoffwechsel

Verschiedene nutritive Faktoren und Hormone haben einen wichtigen Einfluss auf den Knochenstoffwechsel. Diese sollen in den nachfolgenden Kapiteln kurz genauer erläutert werden.

### 3.5.2.1. Calcium- und Phosphathaushalt

Calcium (Ca) und Phosphor (P) sind essentielle Mengenelemente, die in einem ausgewogenen Verhältnis (beim kleinen Wiederkäuer ungefähr 2:1, je nach Alter und Nutzungsart des Tieres) mit der Nahrung zugeführt werden müssen. Calcium hat verschiedene Funktionen im Körper. Es spielt eine wichtige Rolle für die Erregbarkeit von Nerven und Muskeln, es ist für den Stoffwechsel, die Blutgerinnung und die Durchlässigkeit von biologischen Membranen von Bedeutung. Zusammen mit Phosphat wird es in Form von Hydroxylapatit im Knochen eingebaut und verleiht so diesem seine Formbeständigkeit und Härte. 99% des im Körper vorhandenen Calciums befinden sich im Knochen, welcher damit den grössten Calciumspeicher des Körpers darstellt (Kaune, 2000). Adulte Schafe haben einen täglichen Bedarf von etwa 4 g Ca (Jeroch et al., 1999). Auch Phosphat ist zu 85% im Skelett anzutreffen. Beim Wiederkäuer ist zu beachten, dass der Phosphathaushalt erhebliche Unterschiede zum Monogastrier aufweist. Falls die P-Aufnahme über das Futter nicht ausreicht, gelangt durch Sekretion über den Speichel zusätzlich Phosphat in den Pansen. Die Pansenmikroorganismen sind auf diese endogene Phosphorzufuhr angewiesen, da P ein unerlässlicher Bestandteil für ihre Stoffwechselvorgänge ist. Die Rezyklierung des Phosphats wird als endogener Phosphat-Kreislauf bezeichnet (Huber, 2003).

Calcium und Phosphor beeinflussen sich gegenseitig in ihren Wirkungen und bilden ein empfindliches Gleichgewicht im Körper. Diese Calcium-Phosphat-Homöostase mit den drei Hauptzielorganen Knochen, Darm und Nieren wird hauptsächlich durch die Hormone Parathormon, Calcitonin und Calcitriol ( $1.25(\text{OH})_2$ -Vitamin D) geregelt.

### 3.5.2.2. Parathormon (PTH)

PTH wird in den Epithelkörperchen der Nebenschilddrüse gebildet und hat seine primäre Bedeutung in der Regulation des Calciumhaushaltes. Wichtigster Stimulus für die Parathormon-Ausschüttung ist ein Calciummangel im Blut, aber auch eine Hypocalcämie mit gleichzeitigem P-Überschuss oder eine Hyperphosphatämie bewirken eine Freisetzung von PTH. Um entstandene Ungleichgewichte der Calcium-Phosphat-Homöostase wieder zu normalisieren, bewirkt Parathormon indirekt über  $1.25(\text{OH})_2$ -Vitamin D ( $1.25 \text{ Vit D}$ ) eine gesteigerten Ca und P Absorption im Dünndarm. Ein direkter Effekt des PTH am Darm ist nicht bekannt (Kaune, 2000).

Am Skelett führt PTH zu einer Aktivierung der Osteoklasten und einer Hemmung der Osteoblasten. Darüber hinaus kann PTH auch das Wachstum und die Differenzierung von Osteoblasten und deren Vorläuferzellen stimulieren (Ross und Pawlina, 2006).

In der Niere wird durch Einfluss von Parathormon die Calcium-Rückresorption im distalen Tubulus gesteigert und dadurch, dass die tubuläre Rückresorption von P gesenkt wird, die

Phosphorausscheidung maximiert. Für die Synthese von  $1.25(\text{OH})_2$ -Vitamin D in der Niere ist PTH die wichtigste Einflussgrösse (Lips, 2006). Es stimuliert die  $1\alpha$ -Hydroxylase und hemmt die 24-Hydroxylase (Zierold et al., 2003). Die  $1\alpha$ -Hydroxylase ist entscheidend für die Bildung von  $1.25(\text{OH})_2$ -Vitamin D, während das Enzym 24-Hydroxylase bei einem Überschuss von  $1.25$  Vit D, die etwa 10.000-Mal inaktivere Form, das  $24.25(\text{OH})_2$ -Vitamin D produziert, um so einem  $1.25(\text{OH})_2$ -Vitamin D Überschuss vorzubeugen. Die Wirkung von PTH ist genau gegensätzlich der Wirkung des  $1.25$  Vit D, welches eine Induktion der 24-Hydroxylase und eine Hemmung der  $1\alpha$ -Hydroxylase auslöst (Hausler, 1986).

Sobald sich der Calcium-Plasmaspiegel normalisiert hat, nimmt die PTH Produktion über eine negative Rückkopplung an den Calciumrezeptoren der Epithelkörperchen wieder ab.

### 3.5.2.3. Calcitonin (CT)

Calcitonin wird in den parafollikulären Zellen, den sogenannten C-Zellen, der Schilddrüse gebildet. Hauptaufgabe des Calcitonin ist es, den Calciumspiegel zu senken. Die C-Zellen besitzen eigene Calciumrezeptoren und reagieren auf eine Hypercalcämie mit Ausschüttung von CT. Im Gegensatz zum Parathormon, welches eher für eine langsame Grobregulation des Calciumhaushaltes verantwortlich ist, ist Calcitonin für eine schnelle Feinsteuerung zuständig.

Am Knochen führt es zu einem vermehrten Einbau von Ca und Phosphat. Die Osteoklasten haben einen eigenen CT-Rezeptor und ihre Aktivität wird durch Calcitonin gehemmt, während die Proliferation der Osteoblasten durch CT gefördert wird. Damit wirkt es antagonistisch zum Parathormon, an der Niere allerdings, wirkt es synergistisch zum PTH, und veranlasst hier ebenfalls eine gesteigerte Phosphorausscheidung bei gesteigerter Calciumresorption (Silbernagel und Despopoulos, 2001). Ein direkter Effekt auf die Calciumausscheidung an der Niere konnte allerdings bisher nicht nachgewiesen werden. Es wird diskutiert ob CT hier die Bildung von Calcitriol hemmt (Kaune, 2000).

### 3.5.2.4. Vitamin D

Vitamin D steht als Sammelbegriff für mehrere Verbindungen mit Vitamin D Wirkung. Neben PTH und CT ist  $1.25(\text{OH})_2$ -Vitamin D (= Calcitriol =  $1.25$  Vit D), welches die biologisch aktive Form des Vitamin D ist, das wichtigste Hormon im Knochenstoffwechsel (Jones et al., 1998). Bei  $1.25$  Vit D handelt es sich um ein fettlösliches Steroidhormon pflanzlichen oder tierischen Ursprungs. Es wird zwischen den beiden Prohormonen Vitamin  $\text{D}_2$  und  $\text{D}_3$  unterschieden. Das Vitamin  $\text{D}_2$  (PVit  $\text{D}_2$ ), auch Ergocalciferol genannt, wird in Pflanzen durch UV-Licht synthetisiert, während das Vitamin  $\text{D}_3$  (PVit  $\text{D}_3$ ), Cholecalciferol, tierischer Herkunft ist. Entweder werden Vitamin  $\text{D}_2$  oder  $\text{D}_3$  direkt mit der

Nahrung aufgenommen und im Dünndarm absorbiert (Blum, 2003) oder aber Cholecalciferol aus 7-Dehydrocholesterol in der Epidermis mit Hilfe von UV-Strahlung synthetisiert (Holick et al., 1980; Mac Laughlin et al., 1982; Bikle et al., 1993). Außer bei Hund und Katze, welche nicht in der Lage sind Vitamin D<sub>3</sub> in der Haut zu synthetisieren (How et al., 1994; Morris, 1999), ist die Synthese in der Haut mit 90% die Hauptquelle für die Vitamin D Versorgung (Holick, 2002). Die Umwandlung von 7-Dehydrocholesterol ist abhängig von Alter, Pigmentierung, Genetik, UV-Intensität und Wellenlänge. So findet die Bildung von PVit D<sub>3</sub> nur bei UV-B Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 290-310 nm statt (Holick et al., 1981; Mac Laughlin et al., 1982; Holick, 2002). Genügend Sonneneinstrahlung sichert also eine ausreichende Vitamin D Versorgung.

Ergocalciferol und Cholecalciferol sind selbst biologisch nicht aktiv und müssen erst in die biologisch aktive Form das 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D (1.25 Vit D) umgewandelt werden. Ergocalciferol und Cholecalciferol werden daher auch als Prohormone oder Provitamine bezeichnet, wobei die umgewandelte Form von PVit D<sub>3</sub> biologisch wirksamer ist als die von PVit D<sub>2</sub> (Trang, 1998).

Durch spezifische Vitamin D-Bindungsproteine gelangen PVit D<sub>2</sub> und D<sub>3</sub> zur Leber. Hier folgt der erste Schritt der Aktivierung: es kommt zur Hydroxylierung durch die 25-Hydroxylase (Jones et al., 1998). Das entstandene 25(OH)-Vitamin D gelangt nun in die Niere, wo es durch das Enzym 1 $\alpha$ -Hydroxylase zu dem biologisch aktiven Produkt 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D hydroxyliert wird (Brunette et al., 1978). Dieser zweite Aktivierungsschritt erfolgt in der Niere, was erklärt, warum es bei Nierenerkrankungen zu Störungen im Vitamin D Haushalt kommen kann (Fraser et al., 1970, Holick et al., 1972). Bei einem Überschuss an 1.25 Vit D kann es alternativ durch die 24-Hydroxylase zur Bildung von 24.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D kommen. Da 24.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D eine 10.000-Mal geringere Aktivität besitzt, gilt diese Reaktion als die wichtigste Deaktivierung von 1.25 Vit D (Jones et al., 1987).

Vitamin D ist für die Regulation des Knochenstoffwechsels und des Calciumhaushaltes essentiell. Die Bildung von Calcitriol (1.25 Vit D) wird durch einen sinkenden Ca-/Phosphatspiegel im Blut, Wachstums- und Sexualhormone stimuliert.

Im Dünndarm steigert 1.25 Vit D die Absorption von Ca und P (Nemere und Norman, 1988). Auch in der Niere kommt es durch 1.25 Vit D zu einer erhöhten Rückresorption von Calcium. Weitere Wirkung am Knochen ist die Förderung der Osteoklastenbildung, während es die Kollagensynthese der Osteoblasten senkt. Somit wird die Knochenresorption gefördert und die Knochenformation gehemmt.



### **3.5.3. Knorpel**

Auch Knorpelgewebe gehört zu den Stützgeweben. Der Unterschied zum Knochen besteht in der chemischen Zusammensetzung der Grundsubstanz und dem Gehalt an Kollagenfasern (Liebich, 2004). Die Interzellulärsubstanz besteht zu 70% aus Wasser, dazu kommen Kollagenfasern und Glycosaminoglykane (GAG), welche aus den wasserbindenden Proteoglykanen (PG), Hyaluronsäure und verschiedenen Seitenketten bestehen. Im Knorpel findet sich vor allem Kollagen Typ II. Knorpelgewebe ist druckelastisch, teils verformbar, stossdämpfend und dabei von fester Konsistenz. Es bildet die Grundlage für das spätere Knochengewebe und stellt das embryonale Stützgerüst dar.

#### **3.5.3.1. Knorpelzellen und Gewebe**

Aus dem mesenchymalen Bindegewebe differenzieren sich Chondroblasten, welche für die Produktion von kollagenen oder elastischen Fasern und Glycosaminoglykanen der Knorpelmatrix zuständig sind. Mit zunehmender Neubildung der Interzellulärsubstanz wird der Abstand zwischen den einzelnen Chondroblasten grösser, diese runden sich ab und differenzieren sich zu Chondrozyten. Diese Knorpelzellen bilden das aktive Stoffwechselzentrum des Knorpels (Liebich, 2004). Sie sind für den Erhalt der Grundsubstanz verantwortlich und synthetisieren Prokollagen, aus welchem dann Kollagenfasern geformt werden.

Es wird zwischen hyalinem, elastischem und kollagenfaserigem Knorpel unterschieden. Die Faserart bestimmt die Eigenschaft des jeweiligen Knorpelgewebes. Für diese Studie ist der im Körper am häufigsten vorkommende hyaline Knorpel entscheidend. Im Folgenden wird daher nicht weiter auf die anderen Knorpelgewebe eingegangen.

Hyaliner Knorpel setzt sich aus Knorpelzellen, Kollagen Typ II und einer homogenen, weitgehend strukturlosen ungeformten Matrix zusammen. Die Kollagenfasern ordnen sich nach den auf sie einwirkenden Zug- und Druckkräften. Hyaliner Knorpel ist die Vorstufe des Knochengewebes, er stellt die Grundlage des embryonalen Stützgewebes dar, auch werden Gelenk-, Rippen-, Nasen- und Atemwegsknorpel aus hyalinem Knorpel gebildet.

Der Abbau von Knorpel erfolgt über spezifische Fresszellen, die sogenannten Chondroklasten. Diese sind besonders im Rahmen der enchondralen Ossifikation aktiv, oder wenn es zu Schäden am Knorpel gekommen ist.

### **3.5.4. Nachweismethoden Knochen- und Knorpelstoffwechsel**

Grundsätzlich gibt es verschiedene Methoden, um Aufschluss über den Knochen- bzw. den Knorpelstoffwechsel zu erlangen.

Die wohl invasivste Methode ist die Entnahme einer Biopsie. Weniger invasiv ist die Entnahme einer Blutprobe, aus welcher verschiedene Marker des Knochenauf- und



-umbaus bestimmt werden können. Auch die verschiedenen Knorpelmarker werden über das Blut bestimmt. Letztlich gibt es noch verschiedene bildgebende Verfahren, hierzu zählen Dualröntgenabsorptiometrie (DEXA), periphere quantitative (pQCT) und die quantitative Computertomographie (QCT), quantitativer Ultraschall (QUS), Magnetresonanztomographie (MRI) und digitale Radiogrammetrie (DXR).

Alle Methoden weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf und erfassen verschiedene Aspekte der Stützgewebe. Sie sind daher nicht miteinander vergleichbar, eine Kombination der verschiedenen Methoden kann aber die Aussagekraft einzelner Werte erweitern (Miller et al., 1999; Gasser, 2001). Im Rahmen dieser Arbeit soll nur auf die im Versuch verwendeten Methoden (pQCT, Knorpel- und Knochenmarker) eingegangen werden.

#### **3.5.4.1. Periphere quantitative Computertomographie (pQCT)**

Die pQCT ist wie auch die QCT ein bildgebendes Verfahren zur Bestimmung der wahren Knochendichte (bone mineral density = vBMD) in  $\text{mg/cm}^3$ . Aus mehreren Röntgenbildern des Objekts aus unterschiedlichen Richtungen wird ein 3D-Bild erstellt. Fehlende Volumeninformationen werden rekonstruiert, indem Einzelschnitte zusammengefügt (Schnittbildverfahren) werden. Anhand des Resultats können entscheidende Informationen bezüglich der Dichte und der Architektur des Knochens erlangt werden. pQCT-Geräte beschränken sich in der Humanmedizin auf Aufnahmen der peripheren Gliedmassen, während mittels QCT auch der Rumpf untersucht werden kann.

Die quantitative Computertomographie unterscheidet im Gegensatz zu anderen densitometrischen Verfahren zwischen trabekulärem (Spongiosa) und cortikalem (Cortikalis) Knochen. Dieses ist interessant, da der trabekuläre Knochen etwa 8-Mal schneller auf metabolische Stimuli reagiert als cortikaler Knochen (Frost, 1964; Vajda et al., 2001). Die Cortikalis dagegen spielt eine entscheidende Rolle für die Bruchfestigkeit des Knochengewebes.

In der Humanmedizin gehört die pQCT zum Goldstandard im Gebiet der Osteoporosediagnose. Im Vergleich zu anderen Methoden hat sie die höchste diagnostische Sensitivität für die Erkennung von Knochenmasseverlusten (Grampp, 2002). Ein weiterer Vorteil der peripheren Computertomographie ist die geringe Strahlenbelastung (Engelke, 2002). Diese liegt, wenn die natürliche Strahlenbelastung von 2400  $\mu\text{Sv}$  bedacht wird, bei einem vernachlässigbaren Wert von 1-7  $\mu\text{Sv}$  pro Aufnahme.

### 3.5.4.2. Knochenmarker

Heutzutage können über Blut und Urin verschiedene Konzentrationen von Biomarkern der Knochenhomöostase nachgewiesen werden. Diese sind Produkte, die bei den ständigen Umbauprozessen im Knochen durch die Osteoblasten (Aufbau) und Osteoklasten (Abbau) freigesetzt werden. Je nach Herkunft werden sie unterteilt in Marker der Knochenformation und in Marker der Knochenresorption. In den Tabellen 2 und 3 ist eine Übersicht verschiedener Knochenmarker dargestellt.

**Tab. 2:** Übersicht der gebräuchlichsten Knochenformationsmarker:

<b>Marker Knochen- formation</b>	<b>Herkunftsgewebe</b>	<b>Medium der Analyse</b>	<b>Testmethode</b>
<b>OC*</b>	Knochen, Thrombozyten	Serum	RIA, ELISA, IRMA, EIA*
<b>AP</b>	Leber, Darm, Knochen, Niere, Plazenta	Serum	Colorimetrie
<b>bAP*</b>	Knochen	Serum	ELISA*, EIA, IRMA, Präzipitation, Colorimetrie
<b>PICP</b>	Knochen, Sehnen, Haut	Serum	Elektrophorese, RIA, ELISA
<b>PINP</b>	Knochen, Bindegewebe, Haut	Serum	RIA, ELISA, Immunoassay

\* in dieser Studie verwendete Marker und Testmethoden

**Tab. 3:** Übersicht der gebräuchlichsten Knochenresorptionsmarker:

<b>Marker Knochen- resorption</b>	<b>Herkunftsgewebe</b>	<b>Medium der Analyse</b>	<b>Testmethode</b>
<b>PYD</b>	Knochen, Knorpel, Weichteile	Serum/Urin	HPLC, ELISA, RIA
<b>DPD</b>	Knochen, Dentin	Serum/Urin	HPLC, ELISA, RIA
<b>SCL:NTX</b>	Knochen	Serum/Urin	EIA, ELISA, RIA
<b>CTX*</b>	Knochen	Serum*/Urin	ELISA, RIA*, ECLA
<b>I-CTP</b>	Knochen, Haut	Serum	RIA
<b>HYP</b>	Knochen, Knorpel, Weichteile, Haut	Serum/Urin	Colorimetrie, HPLC

\* in dieser Studie verwendete Marker und Testmethoden

Die Konzentration der Marker erlaubt zwar keine Rückschlüsse auf die Knochenmasse und ist auch nicht krankheitsspezifisch, aber sie spiegelt dennoch sehr sensitiv Abweichungen im Knochenmetabolismus wider (Gasser, 2001).

In der Humanmedizin spielen Knochenmarker vor allem auf dem Gebiet der Osteoporose-Klinik und -Forschung routinemässig eine Rolle. In der Tiermedizin werden vor allem Tests aus der Humanmedizin verwendet. Bei diesen Testkits muss beachtet werden, dass sie nicht tierartsspezifisch sind. Für einzelne Spezies müssen daher erst Referenzwerte erstellt werden, damit die Ergebnisse richtig interpretiert werden können.

Knochenmarkerwerte unterliegen diversen Schwankungen abhängig von Tages- und Jahreszeit, Alter, Geschlecht, Bewegung, Ernährung, Leber- und Nierengesundheit und Genetik des Individuums (Miller et al., 1999). Für die Interpretation der Ergebnisse ist es wichtig, eine Standardisierung der Probenentnahme, des Probenhandlings und der Lagerung einzuführen (Delmas et al., 2000).

### **3.5.4.2.1. Marker der Knochenformation**

#### **Osteocalcin (OC)**

Osteocalcin ist ein kleines Vitamin-K-abhängiges Protein, das unter der Kontrolle von Vit D durch Osteoblasten bei der Matrixmineralisation produziert wird (Power und Fottrell, 1991). Hauptsächlich wird OC durch Osteoblasten synthetisiert, ein geringer Anteil entsteht aber auch durch Synthese der Odontoblasten und Chondrozyten (Delmas et al., 2000). Das gebildete OC wird überwiegend in die extrazelluläre Matrix eingebaut, hier macht es 15% des nicht-kollagenen Proteins aus. Ein kleiner Teil gelangt bei der Produktion direkt ins Blut, wo es mittels Immunoassay im Serum nachgewiesen werden kann (Power und Fottrell, 1991). Lepage et al. (2001) vermuten, dass auch fragmentierte Bruchstücke des Osteocalcins hierbei gemessen werden. Die genaue Funktion des OC bleibt, obwohl das Protein seit über 20 Jahren bekannt ist, allerdings unklar (Calvo, 1996). Es wird vermutet, dass seine Funktion entweder in der Regulation der Osteoblastenreifung oder aber bei der Mineralisation der Knochengrundsubstanz zu finden ist.

Bei Lämmern unterliegt das OC einem circadianem Rhythmus, wobei es zu Maximalwerte in der Nacht kommt (Liesegang et al., 2003). Scott et al. (1993) stellten fest, dass die OC-Konzentration mit der Knochenwachstumsrate bei Lämmern korreliert. Je älter das Lamm, desto niedriger sind die gemessenen Werte. Auch wenn Lämmer mit einem erniedrigten Phosphorgehalt gefüttert werden, kommt es zu niedrigeren OC-Werten, als in Vergleichsgruppen, wo ein höherer Phosphorgehalt verfüttert wird (Corlett und Care, 1988; Scott et al., 1994; Scott et al., 1997). Ziegen haben im Vergleich zu Schafen höhere OC-Werte (Liesegang et al., 2003; Liesegang und Risteli, 2005). Eine Studie an wachsenden Jungschafen auf der Alp zeigte eine signifikante Abnahme des OC-Serum-Wertes in den ersten vier Wochen nach Alpauffahrt, danach pendelte sich der Wert auf ein gleichbleibendes Level ein (Hüttenmoser, 2007). Letztlich ist zu beachten, dass es zwischen verschiedenen Laboratorien zu erheblichen Ergebnisschwankungen bei den gemessenen Werten kommen kann (Seibel, 2000).

#### **Knochenspezifische Alkalische Phosphatase (bAP)**

Die bAP ist ein Isoenzym der Alkalischen Phosphatase. Sie wird von den Osteoblasten beim Knochenaufbau synthetisiert (van Straalen, 1991), und katalysiert die Hydrolyse von Phosphatester an der Zelloberfläche der Osteoblasten. Bei dieser Reaktion entstehen hohe Konzentrationen von Phosphat, welche zur Knochenbildung benötigt werden. Es wird vermutet, dass bAP durch den Abbau von Pyrophosphat die Einlagerung von Calciumphosphatkristallen in die Knochenmatrix verursacht. Zu Zeiten der aktiven Knochenbildung und während des Knochenwachstums liegt bAP in erhöhten

Konzentrationen vor und ist dann im Serum durch Elektrophorese, nicht-isotopem Immunoassay oder RIA zu bestimmen.

Zu einem Anstieg der bAP kommt es bei einer P-Mangelfütterung (Scott et al., 1997). Gegensätzlich zum OC zeigte eine Studie an wachsenden Schafen eine signifikante Zunahme der bAP in den ersten vier Wochen der Alpung. Im Vergleich zu einer im Tal gehaltenen Gruppe waren die bAP-Werte auf der Alp signifikant höher (Hüttenmoser, 2007).

#### **3.5.4.2.2. Marker der Knochenresorption**

##### **Serumcrosslaps und Telopeptide (I-CTP, CTX und NTX)**

Als weiteres Endprodukt des Typ I Kollagen Abbaus werden, je nach Ort der Spaltung, an den linearen Kettenenden des Tropokollagens die Telopeptide I-CTP, CTX oder NTX frei. Kommt es zu einer Spaltung am C-terminalen Kettenende liegen entweder das quervernetzte carboxyterminale Telopeptid des Typ I Kollagens (I-CTP) oder das carboxyterminale Serumcrosslap (CTX) vor. Eine Spaltung am N-terminalen Ende gibt das aminoternale Serumcrosslap (NTX) ab. Bei diesen drei Telopeptiden handelt es sich um spezifische Abbaumarker des Knochens, da sie nur bei Spaltung durch Osteoklasten entstehen, welche einzig im Knochengewebe am Abbau des Kollagen Typ I beteiligt sind (Hanson et al., 1992).

Als verlässlichster Marker bei Ziegen und Schafen stellte sich das I-CTP heraus, da es sehr gut mit der BMD und BMC der Tiere korreliert (Liesegang, 2003). Liesegang und Risteli (2005) stellten während des Wachstums bei Ziegen höhere I-CTP-Werte als bei Schafen fest. Gealpte Schafe wiesen im Gegensatz zu im Tal gehaltenen Tieren signifikant höhere I-CTP und SCL-Werte auf (Hüttenmoser, 2007).

#### **3.5.4.3. Knorpelmarker**

Analog zum Knochen gibt es auch für den Stoffwechsel des Knorpels verschiedene Marker im Blut, die beim Auf- und Abbau des Knorpels freigesetzt werden. In der Reservezone der Epiphysenfuge befinden sich ruhende Chondrozyten. Diese produzieren zuerst Prokollagen Typ II, welches zu Kollagen Typ II synthetisiert wird (Provot und Schipani, 2005). Beim Abbau des Kollagens durch spezifische Proteasen werden die N- und C-terminalen Enden entfernt und es entsteht eine Tripelhelix aus  $\alpha$ -Ketten (Billinghurst et al., 1997). Diese Tripelhelix kann erneut durch proteolytische Enzyme gespalten werden.

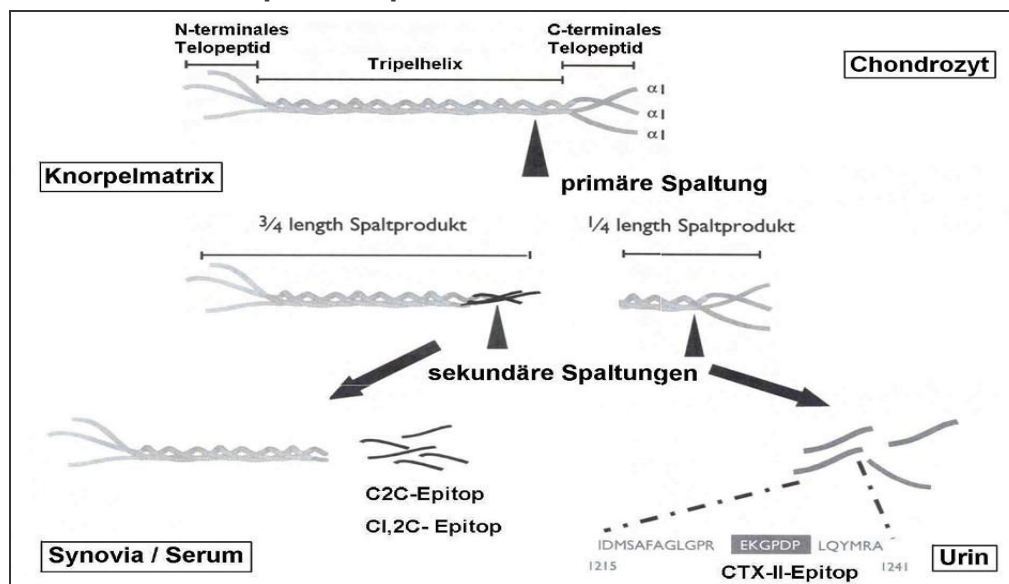
Gelenkerkrankungen, Osteoarthritis (OA) oder andere Leiden, die Knorpelschäden verursachen, führen zu einem Anstieg der Knorpelmarker im Blut (Huebner et al., 2006).

Eine Kombination verschiedener Marker ist sinnvoll, um die Aussagekraft einzelner Werte zu erhöhen (Chevalier und Conrozier, 2005). Die OA-Forschung stellt das grösste Anwendungsgebiet für Knorpelmarker dar (Ameye et al., 2007; Henrotin et al., 2007). In der Tiermedizin gibt es bisher nur wenige Studien mit Knorpelmarkern. Für Wiederkäuer finden sich in der Literatur zwei Studien an Schafen, wo experimentell der Gelenkknorpel geschädigt wurde. Eine Woche nach dem Eingriff fielen die Werte für die Abbaumarker in der Gelenkflüssigkeit signifikant höher aus, als bei Tieren der unbehandelten Vergleichsgruppe (Lu et al., 2006). Bei Giezendanner (2009) kam es nach Operation zu einem Anstieg der Aufbaumarker und einem Abfall der Abbaumarker.

### 3.5.4.3.1. Marker der Knorpelformation

Das Prokollagen II C-Propeptid (CP-II) dient als Marker für den Knorpelaufbau. Wird der Knorpel zerstört, erfolgt eine vermehrte Bildung von Typ II Kollagen. Kollagen wird aus Prokollagen synthetisiert, dabei entstehen Spaltprodukte an den N- und C-terminalen Propeptid-Enden. Diese können im Plasma mittels Immunoassay detektiert werden (Poole et al., 2004). CP-II ist ein mit der Kollagensynthese direkt korrelierendes Spaltprodukt des C-terminalen Endes und der heutzutage am meisten verwendete Knorpelaufbaumarker (Nelson et al., 1998). Messungen sollten immer zur selben Tageszeit stattfinden, da es bei diesem Marker zu circadianen Schwankungen kommt (Kong et al., 2006). Mit dem Alter steigt der CP-II Wert an (Billinghurst et al., 2003).

### 3.5.4.3.2. Marker der Knorpelresorption



**Abb. 6:** Knorpelabbau und Freisetzung von Neopeptiden. C2C: Col2-3/4CLong-Epitop (Collagenase-generated cleavage epitope of collagen type 2); C1,2C: Col2-3/4CShort-Epitop; CTX-II: Carboxyterminales Telopeptid-Fragment des Typ-II-Kollagens. (Schema: OSTEOMedical Group, 2008)

Wird Knorpel abgebaut, werden Proteinfragmente frei, die in die Synovia diffundieren und von dort ins Blut gelangen. Durch eine sekundäre Spaltung der Tripelhelix des Typ II

Kollagens entstehen die als Abbaumarker verwendeten carboxyterminalen Telozeptidfragmente des Typ II Kollagens (CTX-II) und die Collagenase-generated cleavage epitope of collagen type 2 (C2C) (siehe Abb. 6).

CTX-II ist spezifisch für den Abbau von älterem Kollagen, beim Abbau von neu-synthesiertem Kollagen wird dagegen kein CTX-II gebildet (Chevalier und Conrozier, 2005). Mittels ELISA können die verschiedenen Marker der Knorpelresorption im Serum nachgewiesen werden. Wie auch bei CP-II kommt es mit zunehmendem Alter zu einem Anstieg des CTX-II Wertes (Billinghurst et al., 2003). CTX-II ist ein Marker, der schon sehr früh Knorpelabbau bei Knorpelschäden, OA und Gelenkverletzungen anzeigt (Lohmander et al., 2003).

### **3.5.5. Einfluss von Bewegung auf Knochen und Knorpel**

Knochen und Muskeln bilden eine untrennbare Einheit, ohne die keine aktive Bewegung des Körpers möglich wäre. Mechanische Belastung über Muskelaktion ist wichtig für die Grösse und Formbildung des Knochens und der daraus resultierenden Knochenstärke (Bass et al., 2005).

Beim Menschen kommt es von Geburt an zum kontinuierlichen Aufbau der Knochenmasse, bis zwischen dem 20.-30. Lebensjahr die „Peak-bone-mass“ erreicht ist (Schönau, 2002). Während des Wachstums wird der Knochen ständig gefordert und muss sich immer wieder neu dem Längenwachstum und damit veränderten Muskelmassen anpassen. Neben der Schwerkraft, die vor allem gewichtstragende Knochen beeinflusst, haben die durch Muskelbewegung entstehenden Kräfte den grössten und entscheidenden Einfluss auf den Knochenbau (Frost, 1997; Turner, 2000; Schönau, 2002).

Veränderungen durch Bewegung können sich an der Muskelmasse innerhalb von 4-6 Wochen zeigen, während der Knochenumbauzyklus mit Resorption, Formation und Mineralisation 3-4 Monate dauert. Bis ein neuer, stabiler, in bildgebenden Verfahren messbarer Zustand entstanden ist, vergehen eventuell sogar 6-8 Monate. Viele Studien dauern aber nicht länger als 3 Monate an, womit die Ergebnisinterpretation bei diesen Versuchen fraglich ist (Bass et al., 2005).

Gemessen werden sowohl die Knochenmasse (= BMC (Bone Mineral Content, gemessen in g)) als auch die Knochendichte (= BMD (Bone Mineral Density)). Bei der Knochendichte wird je nach Messmethode unterschieden zwischen der areal Bone Mineral Density (aBMD, gemessen in  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , z.B. mittels DEXA) und der wahren Knochendichte (vBMD, gemessen in  $\text{mg}/\text{cm}^3$ , z.B. mittels pQCT). Daneben gibt es noch die Knochenstärke. Diese wird neben Geometrie und Grösse, trabekulärer Mikroarchitektur und Knochenqualität zu 60-80% über die Knochenmasse bestimmt (Joo et al., 2003). Es besteht daher eine sehr grosse Assoziation zwischen dem BMC und der Knochenstärke (Haapasalo et al., 2000).



Die Muskelmasse korreliert sehr eng mit der Knochenstärke (Schönau und Frost, 2002). Vergleiche zwischen einzelnen Gliedmassen der dominanten und nicht-dominanten Seite, zeigen z.B. bei Tennisspielern, eine Zunahme der BMC im jeweilig vermehrt belasteten Arm (Haapasalo et al., 2000). Weitere unzählige Studien der Human- und Tiermedizin belegen den positiven Effekt von Bewegung auf die Skelettentwicklung (Ringe und Steinhagen-Thiessen, 1985; Raab et al., 1990; Yeh und Aloia, 1990; Bourrin et al., 1995; Bendavid et al., 1996; Etherington et al., 1996). Aktivitätsversuche bei Ratten, Mäusen, Pferden und Rindern zeigen bei der aktiven im Vergleich zur inaktiven Tiergruppe positive Veränderungen am Knochen. Je nach Studie kommt es zu einer Zunahme der Knochengrösse, des BMC und / oder der BMD (Raub et al., 1989; McCarthy und Jeffcott, 1992; Mori et al., 2003; Hiney et al., 2004a; Hiney et al., 2004b; Iwamoto et al., 2004; Firth, 2006). Die normalerweise bei fehlender Hormonzufuhr entstehende Osteopenie kann bei kastrierten männlichen Ratten durch Bewegung verhindert werden (Horcajada et al., 1997; Notomi et al., 2002). Aktive Kinder haben eine grössere BMD und BMC als Altersgenossen, die weniger Sport treiben (Wang et al., 2005; Valdimarsson et al., 2006; Tobias et al., 2007). Auch bei Erwachsenen wirkt sich Bewegung positiv auf die BMD aus (Rakovac et al., 2007). Generell ist der Einfluss der Muskelaktivität auf den Knochen im Jugend- und Kindesalter grösser als bei Erwachsenen (Notomi et al., 2002).

Immobilisation oder verminderte Belastung dagegen führt über Reduktion der Muskelmasse zu einer Abnahme an Knochenmasse (Parfitt, 1981; Young et al 1983; Whedon, 1984; Yeh et al., 1993). Dieses Phänomen lässt sich bei Nervenschäden, Querschnittslähmungen, Bettlägerigkeit und Astronauten feststellen (Bass et al., 2005). Versuche an Schafen, bei denen über 12 Wochen ein Hinterbein immobilisiert wurde, führten zu einer signifikanten Abnahme des BMC und zeigten somit, wie wichtig kontinuierliche Bewegung für den Knochen ist (Skerry und Lanyon, 1995).

Für eine Beurteilung der Knochengesundheit sollte stets die Muskelmasse mit berücksichtigt werden (Schönau, 2002). So kann bei normaler Muskulaturausbildung mit einer Abnahme der Knochenmasse von einem pathologischen Knochenstoffwechsel ausgegangen werden, während bei verminderter Muskulatur die Krankheitsursache nicht zwangsläufig im Knochenmetabolismus zu suchen ist.

### **3.5.5.1. Mechanotransduktion**

Schon 1892 stellte Julius Wolff ein Gesetz auf, welches besagt, dass jede äussere Änderung am Knochen durch eine Veränderung der inneren Architektur des Knochens begleitet wird. Die Veränderungen stehen dabei in einem mathematischen Zusammenhang. So kommt es bei verstärktem Druck zu einer Hypertrophie des Knochens, während verminderter Druck zu einer Atrophie führt.

Weiter differenziert wurde das Wolffsche Gesetz von Frost, der 1964 das Prinzip des Mechanostaten aufstellte. Die mechanischen Kräfte, die am Knochen wirken, werden durch verschiedene nicht-mechanische Einflüsse geregelt. Neben Hormonen, Ernährung und Verhalten sind hier vor allem die Knochenzellen beteiligt. Das Netzwerk der Osteozyten reguliert die anderen Knochenzellen soweit, dass sie sich der Belastung entsprechend anpassen. Eine gesteigerte Muskelmasse wirkt sich positiv auf die Knochenmasse, -größe und -stärke aus. Nicht-mechanische Faktoren, wie Calcium, verschiedene Hormone und Vitamin D üben eine leitende und stimulierende Funktion auf die mechanischen Faktoren aus, können diese aber nicht ersetzen (Schönau und Frost, 2002).

Damit es zu einer Adaption des Knochens an die einwirkenden Muskelkräfte kommen kann, muss eine Grenzschwelle überschritten werden (Frost, 1964). Diese Umsetzung von biophysikalischen Kräften in zelluläre Antworten wird als Mechanotransduktion bezeichnet. Hormone können hierbei über Wege der Signaltransduktion Effekte von mechanischer Belastung erhöhen oder vermindern (Turner und Pavalko, 1998). Die Mechanotransduktion unterteilt sich in vier Schritte (Duncan und Turner, 1995):

1.) Mechanische Kopplung: Durch mechanische Kräfte, die an den Knochenzellen Verformungen verursachen, entstehen Flüssigkeitsbewegungen im Knochen. Diese werden durch biomechanische Kopplung, dem 2.) Schritt, von mechanischen Signalen in biochemische Signale umgewandelt. Im 3.) Schritt kommt es zur Übertragung des Signals auf die entsprechenden Knochenzellen und wird in diesem Zellverband mittels gap-junctions weitergeleitet. Der 4.) Schritt umfasst die resultierende Zellantwort, je nach Stimulation kommt es zu einem Knochenauf- oder -abbau.

Dieses ständige „Modeling“ und „Remodeling“ ist eine Anpassungsreaktion des Knochens, um optimal seinen physiologischen Funktionen zu genügen. Knochen muss sowohl den normalen Alltagskräften als auch minimalen (low-strains) oder maximalen Kräften (high-peak-strains) standhalten, ohne Frakturen oder Mikroschäden zu erleiden (Frost und Schönau, 2000).

### **3.5.5.2. Lokalisation der durch Bewegung verursachten Veränderungen**

Je nach Aktivität und belasteter Muskulatur ist der knochenanabole Effekt nicht in allen Knochen des Körpers gleich. Notomi et al. stellten 2001 und 2002 bei kletternden Ratten fest, dass es nur an den direkt an der Muskelbewegung beteiligten Knochen, in diesem Falle Tibia und Femur, und nicht an den Lumbalknochen, zu einer vergrößerten BMD und BMC kommt. Auch Biewener et al. (1983) und Plochoki et al. (2008) bemerkten, dass es an der konischen Tiergliedmasse vor allem proximal zu einer verstärkten Belastung kommt.

Einig ist sich die Literatur, dass Bewegung zu einem verstärkten „Modeling“ / „Remodeling“ und einem grösseren BMC führt. Sehr verwirrend dagegen sind die Meinungen, ob es dabei auch zu einer Zunahme der BMD kommt. Hier liegt das Problem vor allem darin, dass meist nicht zwischen aBMD oder vBMD differenziert wird. Auch gibt es unterschiedliche Meinungen, ob diese Veränderungen nun die Spongiosa oder Cortikalis betreffen. So ist es mittels DEXA z.B. nicht möglich, diese beiden Anteile des Knochens zu unterscheiden.

Schönauf (2002) stellte fest, dass es sich bei der Knochendichte der Spongiosa mehr oder weniger um eine altersunabhängige Naturkonstante handelt, die nicht wesentlich durch Muskelkraft beeinflusst wird. Vielmehr beeinflusst die Muskelkraft dagegen die Knochenmasse. Dieser Einfluss ist überwiegend an dem direkten Ansatzpunkt, der Knochenwand, also der Cortikalisfläche des Knochens zu finden und kann dort Veränderungen der Knochenmasse, -form und -stärke bewirken. Die enge Korrelation von Muskelfläche und Cortikalisfläche ist altersunabhängig, sie wurde sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen festgestellt.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Haapasalo et al. (2000). In dieser Studie wurden die Armknochen von Tennisspielern im Seitenvergleich mittels pQCT untersucht. Ziel war es unter Berücksichtigung der geometrischen Formveränderungen der Knochen herauszufinden, zu welchen Veränderungen es unter Bewegung am Knochen genau kommt, und wo die genaue Lokalisation dieser ist. Es zeigte sich, dass die Zunahme des BMC in der dominanten Gliedmasse auf eine Grössenzunahme des Knochens im Vergleich zur nichtdominanten Gliedmasse zurückzuführen ist. Der gesamte Querschnitt des Knochens war vergrössert, es war vor allem eine Zunahme der Cortikalisfläche, insbesondere der kortikalen Wanddicke zu finden. Die vBMD des Knochens änderte sich dagegen weder trabekulär noch kortikal. In Studien, wo die Formänderungen des Knochens nicht berücksichtigt wird, und es auch zu keiner Differenzierung zwischen kortikalem und spongiösem Knochen kommt, wird daher oft verallgemeinernd von einer Zunahme der BMD gesprochen, obwohl sich lediglich Wanddicke und Form des Knochens und das Verhältnis von Cortikalis zu Spongiosa geändert haben. Korrekterweise sollte in diesem Fall nur von einer Zunahme der aBMD gesprochen werden. Im Widerspruch dazu steht eine Studie von Rico et al. (1994), wo ebenfalls mittels pQCT der Einfluss von Bewegung auf Knochen untersucht wurde. Wie auch in anderen Studien ergaben sich keine Veränderungen der Spongiosa, dafür wurde festgestellt, dass vermehrte Bewegung die vBMD der Cortikalis steigert. In dieser Studie wurde die Knochendichte allerdings nur an einem Punkt gemessen. Dabei können Messwerte der Cortikalis und Spongiosa an verschiedenen Knochenstellen, je nach Belastungsintensität des Bereiches, zu

variierenden Ergebnissen führen (Haapasalo et al., 2000). Für eine bessere Aussagekraft sollte daher stets an mehreren Punkten gemessen werden.

Einen weiteren Widerspruch ergibt eine Mikro-CT Studie an Ratten mittels 3D-Bildtechnik (Joo et al., 2003). Neben der bereits bekannten Vergrößerung der Cortikalisfläche und Wanddicke kommt es hier auch zu Veränderungen der trabekulären Mikroarchitektur. So verursacht Bewegung hier eine Zunahme der Trabekeldicke und steigert deren Anzahl.

Zusammenfassend ist, trotz widersprüchlicher Angaben in der Literatur, davon auszugehen, dass Veränderungen durch Bewegung zu einer vergrößerten Knochenmasse mit daraus resultierender vergrößerter Knochenstärke führen. Auch kommt es durch Bewegungsaktivität zu einer erhöhten BMD. Hierbei ist unklar, ob sich nur die aBMD oder auch die vBMD ändern. Die Veränderungen betreffen vor allem die Cortikalis, wobei Uneinigkeit herrscht, ob auch die Spongiosa betroffen ist.

Immobilisation führt dagegen zur Resorption von cortikalem Knochen bei gleichzeitiger Verdünnung und Veränderung der trabekulären Struktur mit Abnahme der vBMD. An den Epiphysen sind hierbei Massenverluste der Knochensubstanz stärker ausgeprägt als an den Diaphysen (Bass et al., 2005).

### **3.5.5.3. Art, Intensität und Frequenz der Bewegung**

Je nach Art und Intensität hat körperliche Aktivität einen unterschiedlichen Einfluss auf den Knochenbau. Es wird zwischen zwei verschiedenen Arten der Bewegung unterschieden.

Zum einen gibt es die „weight-bearing exercise“. Hierbei wirkt zusätzlich zur Körpermasse die Schwerkraft aktiv belastend auf Muskulatur und Knochen. Zu dieser Bewegungsform zählen alle Sportarten, inklusive der normalen Fortbewegung, die nicht in der Schwerelosigkeit oder im Wasser stattfinden. Alle Aktivitäten, wo keine oder verminderte Schwerkraft beteiligt sind, werden als „non-weight-bearing exercise“ bezeichnet. Diese umfassen vor allem die verschiedenen Schwimmsportarten. Verschiedene Studien, in welchen Schwimm- und Laufaktivitäten bei Mensch oder Tieren verglichen wurden, zeigten, dass „non-weight-bearing exercise“ dabei zu geringeren Zunahmen der BMD führen (Taaffe et al., 1995; Courteix et al., 1998; Emslander et al., 1998; Huang et al., 2003).

Die „weight“- und „non-weight-bearing exercise“ werden unterteilt in Ausdauertraining (wenig Krafteinsatz („low-strain“) bei grosser Wiederholung) und Krafttraining (maximaler Krafteinsatz („high-peak-strain“) mit wenigen Wiederholungen).

Es sind vor allem die „high-peak-strains“ und kaum die „low-strains“, die dabei knochenformend wirken (Rubin und Lanyon, 1985; Skerry und Lanyon, 1995). Schießl und Willnecker (2000) gehen sogar soweit zu behaupten, dass Training, das nicht zu einer

gewissen Mindestverformung des Knochens führt, zu keiner Steigerung der Knochenmasse führt.

Die natürliche Bandbreite der Bewegung umfasst neben der normalen gleichmässigen Belastung vielfach „high-peak-strains“ (Moreno et al., 2008). Gerade beim Fluchttier ist es besonders wichtig, dass der Knochen plötzlicher massiver Beschleunigung mit Sprüngen und schnellen Wendungen standhält.

Biewener et al. stellten 1983 bei Springpferden fest, dass es gerade durch starke und abrupte Bewegungen zu deutlich grösseren Kompressions- und Dehnungskräften am Knochen kommt. Weitere Studien, in denen Kraft- mit Ausdauertraining verglichen werden, belegen, dass Krafttraining zu einer stärkeren Stimulation des Knochens mit einer höheren BMD führt (Conroy et al., 1993; Heinonen et al., 1993; Westerlind et al., 1998).

Nicht allein die Muskelgrösse ist entscheidend (Turner, 2000), sondern auch die Beschleunigung. Gerade Aktivitäten, die zu grossen Beschleunigungskräften führen, wie Sprinten, Volleyball, Tennis oder Turnen, verursachen eine stärkere Verformung des Knochens mit einer daraus resultierenden verstärkten Knochendichte (Bennell et al., 1997; Cornelissen et al., 1999; van de Lest et al., 2003; Hiney et al. 2004a; 2004b). Weniger Beschleunigungskräfte mögen auch die Ursache verminderter BMD bei den „non-weight bearing exercises“ wie Schwimmen sein (Courteix et al., 1998; Taaeffe et al., 1995).

Neben der Intensität der Bewegung ist auch die Frequenz entscheidend. Am gesündesten ist moderates Training, was die Knochenmasse erhöht und / oder einen Abbau der Knochenmasse verhindert (Goseki et al., 1995; Davicco et al., 1999; Mori et al., 2003; Hagihara et al., 2005; Rakovac et al., 2007; Tobias et al., 2007). Optimale Trainingsregimes variieren zwischen den Tierarten und einzelnen Individuen. Leistungsanforderungen sollten dem jeweiligen Tier angepasst sein und dem natürlichen Verhaltensrepertoire entspringen. Exzessives Training, wie z.B. Marathonlauf, kann dagegen zu einer Abnahme der Knochenmasse führen. Neuere Studien dagegen zeigen, dass bei exzessivem Training die Verluste am Knochen auf eine negative Energiebilanz des Individuums zurück zu führen sind (Zanker und Swaine, 2000; Bass et al., 2005).

Zusammenfassend gibt es drei Grundregeln bei der Anpassung von Knochen auf mechanische Stimuli (Turner, 1998): 1.) Statische Kräfte sind weniger modulierend als dynamische Kräfte (Lanyon und Rubin, 1984). Hierbei ist der Stimulus umso stärker, je höher die Frequenz oder je grösser die Kraft dahinter ist (Turner et al., 1994; 1995). Die Frequenz ist dabei ausschlaggebender als die Kraft (Bass et al., 2005). 2.) Um eine Anpassung zu erreichen sind nur kurze mechanische Stimuli nötig. 3.) Knochenzellen passen sich Dauerstimulation, z.B. durch Schwerkraft, an und reagieren vorwiegend auf „high-peak-strains“.

#### **3.5.5.4. Ernährung und Bewegungsapparat**

Die beiden Schlüsselfaktoren für die Knochen- und Muskelentwicklung sind Ernährung und Bewegung. Muskelaktion wirkt zum einen direkt auf den Knochen und gleichzeitig indirekt auf diesen über endokrine Regulation. Die Ernährung dagegen wirkt ausschliesslich indirekt über endokrine Faktoren auf die Knochen- und Muskelentwicklung (Bass et al., 2005). Bei einer ausgewogenen Ernährung kann gesteigerte Bewegung zu verstärkter Muskelkraft führen, welches wiederum zu einer Steigerung der Knochenstärke führen kann.

Die wichtigsten Faktoren für die Muskelentwicklung im Bezug auf die Ernährung sind Gesamtenergie-, Protein- und Calciumaufnahme. Im Gegensatz zur Bewegung, welche je nach Dauer und Intensität den Knochen beeinflusst, haben Nahrungsbestandteile einen nicht-mengenabhängigen Einfluss auf den Knochen. Bisher hat noch keine Untersuchung erwiesen, dass es bei gesteigerter Aufnahme gewisser Substanzen zu einem Aufbau am Knochen kommen kann (Bass et al., 2005). Bei einem bettlägerigen Patienten, der keinerlei körperliche Aktivität ausübt, verhindern weder Vitamin D noch Calciumgaben einen Abbau des Knochens. Hormone und Nahrung allein können den leitenden Effekt mechanischer Belastung durch die Muskulatur nicht ersetzen (Rauch und Schönau, 2001). Einziger Fall, wo es alleine durch gesteigerte Nahrungsaufnahme zu einer Erhöhung der Knochenmasse kommen kann, ist über die Zunahme an Körpergewicht, wodurch es zu einer höheren Belastung der gewichtstragenden Knochen kommen kann.

Gravierende Effekte auf den Knochen entstehen in Mangelernährungssituationen. Durch Nahrungsmangel nehmen Körper- und Muskelmasse ab, zusätzlich kann es noch zu hormonelle Entgleisungen kommen. Gerade im Wachstum kann dies zu verheerenden Folgen mit reduziertem Längenwachstum und massiven Knochenmassenverlusten führen. Bei Adulten ist kein Effekt auf das Längenwachstum feststellbar, hier kommt es „nur“ zu einem geringeren Körpergewicht mit den je nach Ausmass dafür verbundenen Folgen für den Knochenmetabolismus (Bozzini et al., 1994; Alippi et al., 2002).

Sobald die Ernährung jedoch einen anabolen Stoffwechsel garantiert, ist die Knochenstärke stets proportional zu den auf sie einwirkenden „high-peak-strains“ (Bass et al., 2005). Bass et al. (2005) vermuten, dass selbst bei Mangelernährung die Knochenmuskeleinheit solange stabil bleibt, bis es zu hormonellen Inbalancen kommt.

#### **3.5.5.5. Knorpel und Bewegung**

Aufgabe des Gelenkknorpels ist es, eine widerstandslose, gleichmässige Übertragung der verschiedenen Bewegungskräfte zu ermöglichen. Gelenke sind so gestaltet, dass sie über Jahre hinweg mechanischen Belastungen, die oft ein Vielfaches des Körpergewichts



betragen, ohne Schäden standhalten können. Letztlich liegt die einzige Funktion des adulten Knorpels in der mechanischen Kompetenz (Eckstein et al., 2006).

Zur vollständigen morphologischen Entwicklung des Gelenkknorpels kommt es erst relativ spät nach der Geburt. Erst mit Beenden der enchondralen Ossifikation im Erwachsenenalter wird diese Entwicklung abgeschlossen (Eckstein et al., 2006). Vielfach wurde vermutet, dass dieser Entwicklungsprozess durch mechanische Stimuli beeinflusst wird. Hier ist sich die Literatur allerdings uneinig, wie genau, in welchem Ausmass und welche morphologischen Folgen dieses für den Knorpel hat.

Egal ob sich diese Veränderungen nun langfristig äussern, fest steht, dass sowohl statische wie auch dynamische Belastungen kurzfristig, im Moment der Belastung zu Veränderungen am Knorpel führen. Je nach Belastungsintensität, -dauer, -typ (statisch oder dynamisch), -region und Entwicklungsphase variieren diese Veränderungen am Knorpel. Die durch Aktivität entstehenden Kräfte wirken unabhängig auf die verschiedenen Bestandteile des Knorpels und beeinflussen diesen (Li et al., 2001). Laut Arokoski et al. (2000) tragen neben den genetischen Anlagen des Individuums auch systemische Faktoren wie Alter und Geschlecht, zusätzlich zu den biomechanischen Faktoren wie Gelenkwinkel, Belastungsstärke und Verformung, zu der individuellen Bildung des Gelenkknorpels bei.

Menschlicher Knorpel in vivo verformt sich nur wenig unter Belastung und die entstandene Deformation ist bereits nach 90 min nicht mehr erkennbar. Auch bei grösseren Kräften ändert sich der maximale Deformationsgrad des Knorpels nicht (Eckstein et al., 1999)

Die Knorpelverformung ist ein komplexes Zusammenspiel aus 1.) der Belastung, die auf das Gelenk wirkt, 2.) der Verteilung der Belastung und 3.) den mechanischen Eigenschaften des Knorpels (Eckstein et al., 2006). Die Fähigkeit der Knorpeldeformation nimmt mit zunehmendem Alter ab; Geschlecht und Trainingszustand haben keinen Einfluss auf die Verformbarkeit (Eckstein et al., 2006).

Bisher wurde vor allem angenommen, dass dynamische Belastung für die Entwicklung und das Wachstum des Knorpels entscheidend sei. Brand et al. (2006) konnten aber auch einen wichtigen Einfluss statischer Belastung auf den Knorpel belegen. Auch Torzilli et al. wiesen bereits 1997 auf die reduzierte Produktion von Proteoglykanen bei statischer Belastung hin.

Gesunder Knorpel wird mit einer gesteigerten Bildung von Knorpelmatrixkomponenten (z.B. Chondrozyten, GAG) assoziiert. Dynamische Belastung fördert diese Bildung (Sah et al., 1989; Torzilli et al., 1997; Li et al., 2001). So ist die Biosyntheseaktivität von Chondrozyten durch mechanische Stimulation reguliert (Waldman et al., 2003). Auch ist die Amplitude der Deformation am Gelenkknorpel mit der Amplitude der mechanischen

Stimulation, welche die Chondrozyten stimuliert, gekoppelt (Sah et al., 1989; Urban, 1994). Darüber hinaus führt dynamische Belastung zu einem gesteigerten Wachstum des Epiphysenfugenknorpels (Simon, 1978). Im Moment der Krafteinwirkung sind Veränderungen am Knorpelvolumen unter dynamischer Belastung signifikant grösser als unter statischer Belastung (Eckstein et al., 2006).

Langfristig dagegen hat sportliche Aktivität und damit verbundene gesteigerte mechanische Belastung keinen Einfluss auf die Knorpeldicke beim Menschen (Eckstein et al., 2006). Vielmehr wird als Ursache für die unterschiedlichen Knorpeldicken und Knorpelmassen eine strenge genetische Veranlagung vermutet (Eckstein et al., 2006).

Tierstudien zeigen hier unterschiedliche und sich widersprechende Ergebnisse. Einerseits gibt es viele Studien, in denen eine längerfristige Anpassung des Knorpels an gesteigerte Aktivität gezeigt wird (Simon, 1978; Kiviranta et al., 1988; Arokoski et al., 1993; Murray et al., 1999a; 1999b; Nugent et al., 2004; Firth, 2006). Es kommt zu Änderungen der Knorpeldicke und des GAG- und PG-Gehaltes. Diese durch Bewegung verursachten Abweichungen fallen je nach Versuchsaufbau sehr unterschiedlich aus. Faktoren wie Trainingsdauer, -intensität und Lokalisation der einwirkenden Belastung scheinen hier wichtig zu sein. So kann es am belasteten Knorpel bei Hunden je nach Studie zu einer Ab- oder Zunahme des GAG-Gehaltes kommen (Kiviranta et al., 1988; Arokoski et al., 1993). Bei Pferden und Hunden führt Bewegung zu einer grösseren Knorpeldicke (Kiviranta et al., 1988; Murray et al., 1999a; Firth, 2006). Es gibt aber auch Studien, in denen die Dicke des Knorpels abnimmt (Murray et al., 1999a). Für Wiederkäuer gibt es in diesem Zusammenhang eine Studie von Radin et al. (1982). Hier wurden über einen Zeitraum von 2.5 Jahren Schafe, die täglich vier Stunden auf hartem Betonboden, und Schafe, die sich auf weichem Untergrund bewegten, verglichen. Durch die Bewegung kam es zu einer vermehrten Fibrillenbildung am Knorpel mit Abnahme des PG-Gehaltes und subchondralen Veränderungen. Im Gegensatz dazu gibt es auch Studien, in denen es zu keinen Veränderungen am Knorpel durch Bewegung kommt. So stellten Newton et al. (1997) bei Hunden, die lebenslang in ein moderates Training eingebunden waren (tgl. 4 km Laufen auf dem Laufband), keinerlei Veränderungen in der Zusammensetzung oder den mechanischen Eigenschaften des Knorpels fest. Auch bei moderat trainierten Pferden wird die Knorpelfunktion oder Struktur nicht merkbar beeinflusst, allerdings kommt es bei noch wachsendem Knorpel zu Unterschieden an den einzelnen unterschiedlichen Belastungsstellen (Nugent et al., 2004). Auch Eckstein et al. (2006) vermuten in den unterschiedlichen Reifezuständen des Skelettes der Versuchstiere eine eventuelle Erklärung für die widersprüchlichen Ergebnisse der verschiedenen Tierstudien.

Die Relevanz der Trainingsintensität zeigt sich in Studien, in denen die Tiere einem unterschiedlichen Trainingsregime unterliegen. Bei Hunden führt moderates Training (tgl. 4 km Laufen) zu verstärkter Knorpeldicke und erhöhtem PG-Gehalt (Kiviranta et al., 1988), intensives Lauftraining (tgl. 20 km) dagegen führt zu einer Abnahme der Knorpeldicke und einer Abnahme des PG-Gehaltes (Kiviranta et al., 1992). Eine Studie an zwei Gruppen von Jungpferden, von denen eine Gruppe intensivem Training unterlag, während die andere nur langsam bewegt wurde, zeigte eine signifikant dickere Knorpelmasse bei den intensiv trainierten Tieren (Murray et al., 1999b). Ab einem bestimmten Trainingslevel verbessern sich die biomechanischen Eigenschaften des Knorpels allerdings nicht mehr. So gab es keinen Unterschied dieser bei Hunden, die 4 km/d liefen, von denen, die 20 km/d liefen (Jurvelin et al. 1986; 1990).

Bei zu starker Krafteinwirkung kann es zu degenerativen Veränderungen der Gelenkknorpeloberfläche kommen. In einer Studie zeigten Billingham et al., (2003) bei Fohlen, dass exzessives Training in frühen Lebensmonaten einen negativen Einfluss auf den Knorpelstoffwechsel hat. Bei diesen Pferden zeigte sich im Training ein signifikanter Anstieg von CTX-II, während CP-II sank (Billinghurst et al., 2003). Beide Marker deuten somit auf einen verstärkten Kollagenumbau hin. Moderate Bewegung dagegen hat einen positiven Effekt auf den GAG-Gehalt des Gelenkknorpels (Kiviranta et al., 1988; Billingham et al., 2003; Firth, 2006). Auch steigert moderate Bewegung den Proteoglykangehalt im Gelenkknorpel (Arokoski et al., 2000). Kontinuierlicher Druck auf den Knorpel wiederum setzt die PG-Synthese herab und führt zu Nekrose und Gewebeschäden (Arokoski et al., 2000). Auch bei einer Über- oder Fehlbelastung kann es zu Schäden am Kollagennetzwerk kommen (Murray et al., 1999a; Nugent et al., 2004). Dieses kann unter anderem zu Osteoarthritis führen, welche mit einem irreversiblen Strukturverlust der Knorpelstruktur einhergeht.

Am reifen Knorpel ist die Umbaurate von Kollagen Typ II begrenzt (Nelson et al., 1998). Daher können vor allem bei Jungtieren, die sich noch im Wachstum befinden, erhöhte, durch Bewegung stimulierte Umbauraten anhand von Knorpelmarkern nachgewiesen werden (Brama et al., 2004). Bei Jungtieren beeinflusst mechanische Belastung die Eigenschaften, Entwicklung und Qualität des Knorpels (Nugent et al., 2004). Erwachsene benötigen dagegen vielmehr die mechanische Stimulation, um den Normalzustand und die Funktion des Knorpels zu erhalten (Arokoski et al., 2000).

Reduzierte Belastung wie Immobilisation und Paraplegie führt nachweislich bei Mensch und Tier zu einer Atrophie, und es kommt zu einer Verdünnung der Knorpelschicht (Grumbles et al., 1995; Haapala et al., 1999; Vanwanseele et al., 2002a; 2002b; 2003; Hinterwimmer et al., 2004; Eckstein et al., 2006). Allerdings kann diese Atrophie nicht

immer an allen Körperteilen festgestellt werden. In der Schulter kommt es z.B. trotz Immobilisation zu keiner Reduktion der Knorpelschicht (Vanwanseele et al., 2004). Auch kann es zu topographischen Unterschieden innerhalb eines Gelenkes kommen. Haapala et al. (1999) entnahmen an verschiedenen Stellen des Kniegelenkes Knorpelproben, nicht bei allen kam es allerdings zu signifikanten Unterschieden in der Knorpeldicke, sondern es ergaben sich Unterschiede zwischen den lateralen und medialen Gelenkanteilen. Mit dem Alter kann es ebenfalls zu einer Knorpelverdünnung kommen. So nimmt die Knorpeldicke am Knie alle 10 Jahre um 4% ab (Hudelmaier et al., 2003).

### **3.6. Stoffwechsel und Energiehaushalt von Schaf und Ziege**

Schaf und Ziege gehören zu den Wiederkäuern. Durch die Mikroorganismen im Pansen kommt es zu einer Vorverdauung und Fermentation der aufgenommenen Nahrung. Der Dünndarmchymus besteht somit primär aus den Bestandteilen, die nach der Pansenpassage noch übrig bleiben, dem dort gebildeten mikrobiellen Eiweiss und den flüchtigen Fettsäuren (van Soest, 1994). Die Zusammensetzung und der Nährwert des ursprünglich aufgenommenen Futters unterscheiden sich somit erheblich von dem Anteil, der nach Pansenpassage im Darm ankommt. Leicht verdauliche Nährstoffe wie Stärke und Glucose werden dabei schon fast vollständig durch die Bakterien, Protozoen und Hefen des Pansens verdaut. Es herrscht eine strikte Symbiose mit den Pansenmikroorganismen, ohne die der Wiederkäuer nicht überleben könnte. So ist es z.B. nur durch mikrobielle Fermentation möglich, schwerverdauliche Pflanzenfasern und Anteile aufzuschliessen, um diese energetisch zu nutzen.

#### **3.6.1. Besonderheiten im Wiederkäuer Stoffwechsel**

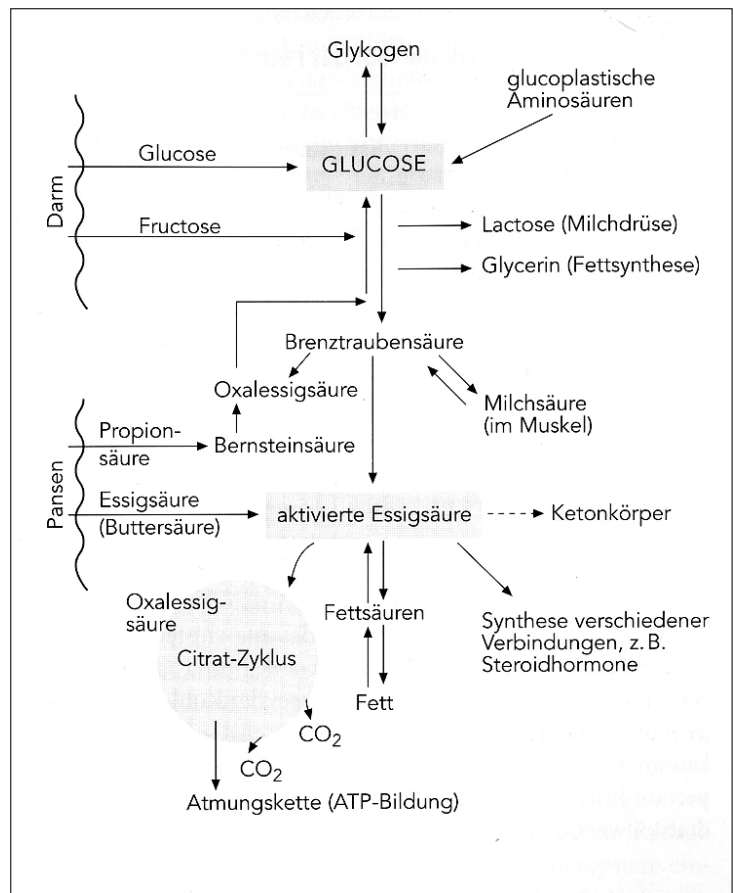
Die normale Ernährung des Wiederkäuers enthält nur wenige für das Tier direkt nutzbare Kohlenhydrate. Ein Grossteil der Kohlenhydrate wird im Pansen über die Stufe der Monosaccharide hinaus direkt zu kurzkettigen Fettsäuren (VFA= volatile fatty acids) zerlegt (Kirchgeßner, 2004). Die Endprodukte des mikrobiellen Abbaus sind Essig-, Propion- und Buttersäure sowie die Gase Methan und Kohlendioxid.

Im Gegensatz zum Nicht-Wiederkäuer wird ein Grossteil der Energie beim Wiederkäuer nicht über Glucose, sondern über Fettsäuren gewonnen. Wenn Acetat und Butyrat nicht gleich in Form der aktivierten Essigsäure zur Energiegewinnung in den Citratzyklus gelangen, können sie über die Stufe der Fettsäuren zu Fett gewandelt werden. Dieser Schritt ist reversibel, und in Energiemangelsituationen erfolgt eine Mobilisation dieses Fettes. Acetat und Butyrat stellen, vor allem über die direkte Einschleusung in den Citratzyklus und damit verbundene Oxidation in der Atmungskette, die wichtigste

Energiequelle für den Wiederkäuer dar. Acetat wird weiterhin zum Fettaufbau benötigt. Propionat steuert ebenfalls einen geringen Anteil zur Energiegewinnung bei, indem es zur Gluconeogenese verwendet wird. Die gewonnene Glucose wird dann, wie bei allen anderen Säugetieren auch, nach zwei Umwandlungen ebenfalls als aktivierte Essigsäure in den Citratzyklus geschleust (siehe Abb. 7).

Alle drei Substanzen (Propionat, Acetat, Butyrat) werden im Pansenepithel absorbiert. Essigsäure hat mit mehr als 90% die höchste Absorptionsrate. Bevor die VFA in freier neutraler Form in den Körperkreislauf gelangen, wo sie in der Leber verstoffwechselt werden, wird ein Teil bereits im Epithel selbst metabolisiert. Vor allem das Butyrat wird dort fast vollständig zu Acetoacetat und  $\beta$ -Hydroxybutyrat abgebaut. Bei Propionat scheint es innerhalb der Wiederkäuerspezies Unterschiede zu geben. So werden

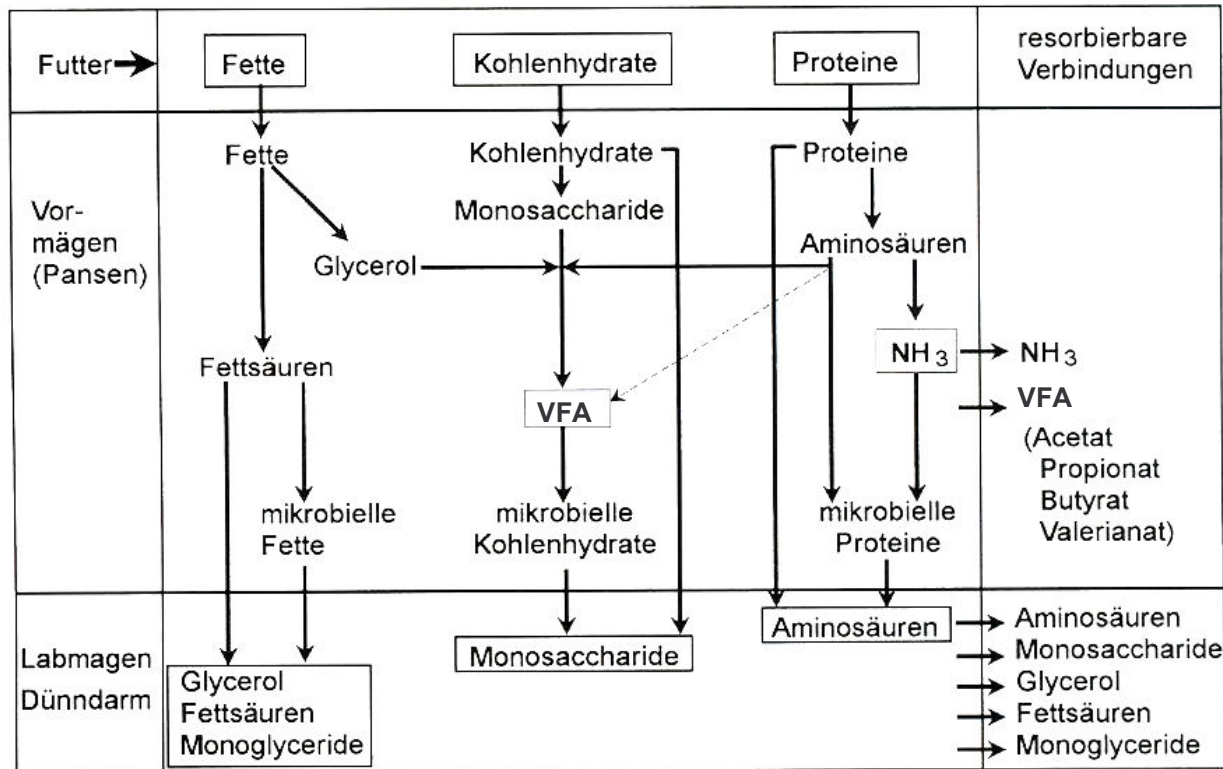
beim Schaf z.B. viel grössere Mengen Propionat im Pansenepithel zu Oxalessigsäure und Lactat umgebaut als beim Rind (van Soest, 1994). Acetat stellt mit 90% den grössten Anteil der VFA im Körperkreislauf dar. Es wird vor allem zur Fettsynthese genutzt (van Soest, 1994). Sowohl Acetat wie auch Butyrat müssen erst durch Acetyl-CoA aktiviert werden, bevor sie in den Citratzyklus zur Oxidation geschleust werden können. Der Wiederkäuerorganismus kann weder aus Acetat noch direkt aus Butyrat Glucose bilden, hierfür dient Propionat, welches über Umkehr der Glycolyse zu Glucose gewandelt werden kann. Diese Glucose kann weiterhin in einem ebenfalls reversiblen Schritt in Milchsäure (Lactat) umgewandelt werden. Auch kann Propionat direkt über eine Umwandlung zu Succinat in den Citratzyklus gelangen. Dieses wird in mehreren Schritten zu Oxalacetat oxidiert, aus Oxalacetat kann sowohl Glucose als auch Citrat oder die Aminosäuren Asparat, Glutamat oder Alanin gebildet werden. Der Hauptmetabolisierungsort für Propionat ist die Leber. Hier werden 80% des aus dem Pansen abgegebenem Propionat



**Abb. 7:** Kohlenhydratstoffwechsel beim Wiederkäuer (Kirchgeßner, 2004)



verstoffwechselt und abgefangen (van Soest, 1994). Eine Übersicht der Stoffwechselwege ist in Abbildung 7 und 8 dargestellt.



**Abb. 8:** Verdauung und Absorption der Hauptnährstoffe beim Wiederkäuer (Jeroch et al., 1999)

Bis zur Passage in den Labmagen und Darm unterscheidet sich der Eiweissstoffwechsel beim Wiederkäuer von dem der Monogastrier. Ein grosser Teil des aufgenommenen Nahrungsproteins wird schon im Pansen umgesetzt. Die Mikroorganismen spalten das Protein, so dass Aminosäuren, Ammoniak und CO<sub>2</sub> entstehen. In diesem Zusammenhang werden von den Mikroorganismen VFA gebildet. Auch NPN-Verbindungen werden zersetzt. Mit Hilfe der Bakterienflora ist es dem Wiederkäuer möglich, essentielle Aminosäuren zu synthetisieren, und er ist damit nicht abhängig von einer Zufuhr dieser über das Futter. Loosli et al. zeigten 1949 erstmals bei Schafen und Ziegen, dass diese bei proteinfreier Diät mit Harnstoff als einziger Stickstoffquelle alle essentiellen Aminosäure bilden können. Allerdings sollte nicht davon ausgegangen werden, dass ein Hochleistungs-Wiederkäuer jederzeit seinen kompletten Bedarf an essentiellen Aminosäuren durch NPN-Verbindungen decken kann, die Synthese kann vielmehr nur bis zu einem bestimmten von mehreren Faktoren abhängigem Maximum erfolgen (Kirchgeßner, 2004).

Eine weitere Besonderheit des Wiederkäuers ist der rumino-hepatische Kreislauf (siehe Abschnitt 3.6.2.4.). Dieser Recycling-Prozess ermöglicht dem Wiederkäuer einen sehr ökonomischen Stickstoffhaushalt, selbst bei mangelnder N-Versorgung, zu führen. Abbildung 8 zeigt eine zusammenfassende Übersicht über die Hauptstoffwechselwege beim Wiederkäuer.



### 3.6.2. Metaboliten des Stoffwechsels

#### 3.6.2.1. Glucose

Einer der wichtigsten Energielieferanten des Körpers ist die zu den Kohlenhydraten gehörende Glucose. Der Glucosestoffwechsel der Wiederkäuer unterscheidet sich in einigen Punkten von dem der Monogastrier (siehe auch 3.6.1.). Wegen des hohen Abbaus im Pansen gelangt nur ein kleiner Anteil der mit der Nahrung aufgenommenen Glucose direkt in den Dünndarm, wo sie absorbiert wird (van Soest, 1994). Diese geringen Mengen vom Darm direkt absorbierter Glucose können bei weitem den Glucosebedarf des Tieres nicht decken (Kirchgeßner, 2004). Daher erfolgt die Hauptgewinnung der Glucose über die Gluconeogenese. 90% der benötigten Glucose werden so produziert. Eine gesteigerte Gluconeogenese findet vor allem direkt nach den Mahlzeiten aus den vorhandenen Substraten statt. Eine effiziente Gluconeogenese ermöglicht dem Wiederkäuer eine gute Anpassung an kohlenhydratarme Diäten (Kirchgeßner, 2004).

Im Gegensatz zu den Monogastriern steigt der Blut-Glucose-Spiegel nach der Nahrungsaufnahme nur gering an. Auch die Fütterung grosser Mengen Propionat verursacht keinen gesteigerten Blut-Glucose-Spiegel. Bei Nahrungsentzug bleibt der Glucosespiegel nicht wie beim Monogastrier durch die verschiedenen gluconeogenetischen Prozesse stabil, sondern er fällt ab (van Soest, 1994). Die Normalwerte für Glucose liegen bei adulten Ziegen zwischen 2.3–3.6 mmol/l und bei Schafen zwischen 2.3–4.2 mmol/l (Tschuor et al., 2008). Plasmawerte für Glucose korrelieren positiv mit der Energiebalance (Reist et al., 2002). Die meisten Studien zeigen bei gealpten Wiederkäuern durchgängig tiefere Glucose-Werte als bei Tieren im Tal (Zemp et al., 1989b; Berry et al., 2001; Leiber et al., 2004). Kreuzer et al. (1998) konnten dagegen keine Unterschiede bei der Glucose-Plasmakonzentration zwischen Rindern im Tal und auf der Alp feststellen.

#### 3.6.2.2. $\beta$ -Hydroxybutyrat (BHB)

Butyrat verlässt nur in geringen Mengen den Pansen. Der Grossteil wird noch im Pansenepithel in Acetoacetat und  $\beta$ -Hydroxybutyrat gewandelt. Das Acetoacetat wird dann entweder zu Aceton decarboxyliert oder ebenfalls zu  $\beta$ -Hydroxybutyrat hydriert (van Soest, 1994). Alle drei Verbindungen werden, obgleich dies chemisch nicht ganz korrekt ist, zu den Ketonkörpern gezählt. In Energiemangelsituationen (Hunger oder Laktation), in denen der Energiegewinn hauptsächlich durch Abbau von Fetten erfolgt, kommt es zur vermehrten Bildung von Ketonkörpern. Dabei werden aus den Fettdepots freie Fettsäuren (NEFA) mobilisiert und in den peripheren Kreislauf abgegeben. In der Leber wird dann BHB gebildet. Der Organismus verwendet das BHB dann entweder direkt im Endabbau in der Muskulatur oder zur Fettsynthese in der Milchdrüse (van Soest, 1994). Der

Plasmawert für BHB ist demnach negativ mit der Energiebalance gekoppelt, das heisst je höher der BHB-Wert desto grösser der Energiebedarf. Auf der Alp findet sich im Vergleich zu im Tiefland gehaltenen Tieren ein erhöhter BHB-Spiegel, das heisst, dass gealpte Tiere einen höheren Energiebedarf haben (Leiber et al. 2004). Die Tiere, die dabei Weidegang hatten, wiesen einen niedrigeren BHB-Wert auf, als die Tiere, die im Stall gehalten wurden (Kreuzer et al. 1998).

Erfolgt eine vermehrte Bildung von Ketonkörpern aufgrund extremer Stoffwechselsituationen (Hunger, Hochlaktation) oder Erkrankungen (Diabetes mellitus), kann es zum Krankheitsbild der Ketose kommen. Der stark erhöhte Ketonkörperspiegel bewirkt einen Protonenüberschuss mit pH-Abfall im Blut, wodurch es zu einer (Keto-) Acidose kommen kann.

### **3.6.2.3. Lactat**

Lactate sind Salze der Milchsäure, die bei der anaeroben Glycolyse entstehen. Bei Sauerstoffmangel in der Muskulatur wird Energie durch die Milchsäuregärung gewonnen. Das hierbei entstehende Lactat wird in den Körperkreislauf abgegeben, in Leber und Niere verstoffwechselt und über die Gluconeogenese abgebaut. Erhöhte Muskelarbeit führt demnach zu einem erhöhten Lactatspiegel im Blut. In der Sportmedizin wird der Lactatwert zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit, der Trainingssteuerung und zur Bestimmung der Lactatschwelle (= anaerobe Schwelle) genutzt. Bei der anaeroben Schwelle handelt es sich um die höchstmögliche Belastungsintensität, welche noch ohne eine Übersäuerung der Muskulatur aufrecht gehalten werden kann. Bis zur Lactatschwelle herrscht ein Gleichgewicht zwischen Lactatbildung und -verbrauch. Die individuelle anaerobe Schwelle ist genetisch determiniert und nicht trainierbar, allerdings ist die Leistungsstufe, ab welcher der Organismus diese Schwelle erreicht, abhängig von vielen trainierbaren Faktoren. Unterhalb der anaeroben Schwelle kommt es überwiegend zur aeroben Energiebereitstellung, die anaerobe Verstoffwechslung ist so gering, dass das entstehende Lactat gleich abgebaut wird. Diese Aufrechterhaltung des „steady state“ ist beim trainierten Sportler besser ausgeprägt. Über der Lactatschwelle erfolgt die Energiebereitstellung zunehmend anaerob. Das entstehende Lactat wird nach Beenden der Belastung durch eine erhöhte Sauerstoffzufuhr mittels Gluconeogenese abgebaut. Längerfristige Ausdauerbelastungen müssen stets unter der Lactatschwelle stattfinden (Neumann, 2009). Zanzinger et al. (1993) stellten für Simmentaler Ochsen und Zebus eine anaerobe Schwelle von 1.6 bzw. 1.7 mmol/l Lactat bei schwerer Zugarbeit fest. Selbst bei schwerer Zugarbeit scheint die anaerobe Energiegewinnung nur eine kleine Rolle beim Rind zu spielen, eintretende Ermüdungserscheinungen liessen sich in dieser Studie vielmehr auf Grenzen des Herz-Kreislauf-Systems zurückführen.

### 3.6.2.4. Harnstoff (Urea)

Harnstoff ist das Endprodukt des Proteinstoffwechsels und stellt mengenmässig den grössten Anteil der stickstoffhaltigen Nichtprotein-Substanzen (NPN) dar. Das im Pansen gebildete Ammoniak wird teils von den Bakterien direkt verwendet, der Rest gelangt zur Entgiftung in die Leber, und wird hier zu Harnstoff umgewandelt (Kirchgeßner, 2004). Beim Wiederkäuer wird der Harnstoff über den Speichel oder in geringen Mengen auch über das Blut zurück in den Pansen geschleust, um dort erneut mikrobiell umgesetzt zu werden. Die Zirkulation des Stickstoffes wird als rumino-hepatischer Kreislauf bezeichnet. Für die Stickstoffversorgung der Pansenmikroorganismen ist dieser endogene Kreislauf essentiell. Das dadurch entstehende sehr hochwertige mikrobielle Protein kann dann im Dünndarm verdaut werden. So können bei proteinarmer Diät bis zu 90% des gebildeten Harnstoffes rezykliert und in den Vormägen wieder genutzt werden (Martens, 2000). Bei proteinreicher und auch energiearmer Ernährung wird überschüssiger Harnstoff, wie bei allen anderen Säugetieren auch, über den Urin ausgeschieden.

### 3.6.3. Energie und Protein: Bedarf und Deckung

Wenn der Energiebedarf nicht durch die Nahrungsaufnahme gedeckt werden kann, ist eine kurzfristige Bedarfsdeckung auch durch Abbau von Körperreserven möglich. Neben dem Grundumsatz wird Energie zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur, Aufbau von Körperbestandteilen, Produktion (Wolle, Milch, Gravidität) und für mechanische Leistung benötigt. Beim Wiederkäuer entstehen zusätzliche Verluste der Futterenergie durch Bildung von Methan und Fermentationswärme im Pansen.

Beim Energiebedarf wird zwischen Minimalbedarf, Erhaltungsbedarf und Leistungsbedarf unterschieden. Vom Minimalbedarf, auch Grundumsatz genannt, wird bei einem nüchternen Tier in thermoneutraler Umgebung mit leichter Muskelaktivität gesprochen. Für den Erhaltungsbedarf werden zusätzlich zum Minimalbedarf Energieverluste für Futteraufnahme, Verdauung, leichte Muskeltätigkeit und Wärmeregulation berechnet. In der Literatur gibt es verschiedene Angaben für den Erhaltungsbedarf mit mittlerer Bewegungsintensität bei Schaf und Ziege. Bei Schafen schwanken diese Angaben zwischen 0.292-0.460 MJ ME/kg<sup>0.75</sup>. Ziegen haben mit 0.365-0.580 MJ ME/kg<sup>0.75</sup> einen etwas höheren Energiebedarf (NRC, 1981; NRC, 1985; Gall, 2001; Lachica und Aguilera, 2003; Kirchgeßner, 2004; Sahlu et al., 2004; Shinde und Karim, 2007). Bei einer Verdaulichkeit des Futters von 60% kann als Richtwert für Schafe ein Wert von 0.430 MJ ME/kg<sup>0.75</sup> und für Ziegen von 0.434 MJ ME/kg<sup>0.75</sup> angenommen werden (Jeroch et al., 1999; Kirchgeßner, 2004). In NEL sind dies Durchschnittswerte von 0.228 MJ NEL/kg<sup>0.75</sup> für das Schaf und 0.268 MJ NEL/kg<sup>0.75</sup> für die Ziege (Thériez et al. 1987; Sauvant und Morand-Fehr, 1991).

Wollwachstum ist meistens schon im Erhaltungsbedarf inbegriffen. Schafswolle wächst täglich um 6-20 g. Das Vlies besteht zu fast 80% aus Protein und enthält 16.3% Stickstoff. Demnach ist für das Wollwachstum zusätzlich ein täglicher Proteinbedarf von 6-20 g zu berücksichtigen. Der Energiebedarf für das Wollwachstum ergibt sich somit vor allem aus dem Proteinbedarf und beträgt ca. 200-300 kJ ME pro Tier und Tag (Jeroch et al., 1999; Kirchgeßner, 2004). Auch in einer N- oder Energiemangelsituation wächst das Vlies weiter, hierfür wird dann körpereigenes Protein z.B. aus dem Muskel abgebaut.

Der Leistungsbedarf an Energie berücksichtigt eine gesteigerte physikalische Aktivität oder die Produktion verschiedener tierischer Substanzen. Je nach Leistung kann es zu einem beachtlichen Mehrbedarf an Energie kommen (siehe 3.6.4.1.).

Nicht nur die Energie-, sondern auch die Proteinversorgung ist wichtig für eine ausgewogene Ernährung. Eine ausreichende Proteinzufuhr ist vor allem während des Wachstums entscheidend. Auch bei Trächtigkeit, Laktation oder gesteigerter physischer Aktivität steigt der Proteinbedarf.

Bei Schaf und Ziege unterscheidet sich der Bedarf nicht und liegt je nach Literatur bei  $3.35\text{--}4.7\text{ g/kg}^{0.75}$  (Jeroch et al. 1999; Kirchgeßner, 2004). Diese Angaben berücksichtigten schon leichte Bewegung und Wollwachstum. Bei einer Haltung der Tiere auf einer extensiven Weide müssen noch 50% und im bergigen Gebieten sogar 75% Mehrbedarf für Bewegung dazu gerechnet werden. Nach Jeroch et al. (1999) sind dieses für 100 kg Körpermasse 1.4 g Rohprotein pro km.

Je nach Tierart, Grösse und Körpergewicht unterscheidet sich die maximale Futteraufnahmekapazität. Kleinere Tiere können im Vergleich zu grösseren Tieren weniger Futter pro kg metabolischer Körpermasse aufnehmen. Schaf und Ziege können rund 4 % Futter pro kg Lebendmasse aufnehmen. Eine 50 kg Ziege kann demnach am Tag ca. 2 kg Trockensubstanz fressen, ein 70 kg Schaf schafft bis zu 2.8 kg TS (Rahmann, 2000). Der mittlere Verbrauch liegt bei 1.72 kg TS pro Tag für das Schaf. Aber selbst bei maximaler Futteraufnahmekapazität ist ein Mindestgehalt an Energie im Futter notwendig. Wiederkäuer sind aufgrund der Grösse ihres Verdauungstraktes in der Lage, mit ihrer Futterration einen hohen Anteil an minderwertigem Futter aufzunehmen, dieses muss dann aber durch längere Fresszeiten kompensiert werden. Die Aufnahme ist zum einen durch die Pansengrösse sowie die Geschwindigkeit der Verdauung begrenzt. Einigen Schafrassen (z.B. Heidschnucken) ist es möglich bei kargem Futterangebot ihr Pansenvolumen zu erweitern (Jeroch et al., 1999). Nimmt die Qualität des Futters ab, reduziert sich auch die Nahrungsaufnahme, da schlechter verdauliches Futter länger im Pansen verweilt und so nicht genügend Kapazität für die Aufnahme von neuem Futter besteht. Solange Nahrungsaufnahmezeiten angepasst werden können, kommt der

Wiederkäuer trotz Aufnahme von energetisch geringwertigen Futterpflanzen nicht in ein Energiedefizit. Die maximale Futteraufnahmezeit liegt bei 14 h pro Tag. Bei vielfältigem Angebot kann durch Selektion von leichter verdaulichem, qualitativ besserem Futter die Nahrungsaufnahmekapazität gesteigert werden. Dieses Futter ist schneller verdaut und somit ist auch schneller wieder Platz im Pansen. Zusätzlich wird die Futteraufnahme noch durch das jeweilige Fressverhalten des Tieres, den physiologischen Status, diverse Umweltfaktoren sowie Erreichbarkeit des Futters beeinflusst (Lyons et al., 1999).

### **3.6.4. Besonderheiten der Alpweidung und deren Einfluss auf den Energiestoffwechsel**

Auf der Alp führen erhöhte Bewegung in schwierigen topographischen Verhältnissen, extreme Klimaschwankungen mit unterschiedlicher Witterung und verminderter Sauerstoffpartialdruck zu einem erhöhten Energiebedarf der Tiere. Verschiedene Studien zeigen, dass es bei gealpten Wiederkäuern im Vergleich zu Kontrolltieren im Tal zu einer Gewichtsabnahme kommt (Bianca und Hays, 1977; Bianca und Kunz, 1977; 1978; Berry et al., 2001). Die Gewichtsreduktion ist vor allem zu Anfang der Alpzeit zu beobachten (Bianca und Hays, 1977; Berry et al., 2001; Leiber et al., 2004). Neben oben genannten Bedingungen können sich aber auch der Transportstress und die Futterumstellung negativ auf die Gewichtsentwicklung auswirken (Zemp, 1989a; Kreuzer et al., 1998).

#### **3.6.4.1. Energetischer Mehrbedarf durch vermehrte Bewegung**

Körperliche Anstrengung verbraucht mehr Energie und führt durch eine Erhöhung der Körpertemperatur und einen Anstieg der Herz- und Atemfrequenz zu einem gesteigerten metabolischen Umsatz (Coulon und Pradel, 1997; Brosh et al., 1998; Coulon et al., 1998; Brosh, 2007).

Alpweiden sind topographisch sehr vielfältig und umfassen im Relief verschiedene Höhenstufen. Neben den horizontalen Bewegungen umfasst das Bewegungsspektrum eines hier weidenden Tieres auch die viel anstrengenderen vertikalen Bewegungen. Im Vergleich zum Flachland ist die Futtersuche in Bergregionen daher mit einem höheren Energieaufwand verbunden. Weideaktivität in der Ebene verlangt einen Zuschlag von etwa 50% zum Erhaltungsbedarf (Gall, 2001). Shinde und Karim (2007) geben für normalen Weidegang den Mehrbedarf sogar mit 25-100% an. Für Bewegungsaktivität bei kleinen Wiederkäuern im Flachland wird je nach Literatur mit 1.79–3.8 J ME/kg LM/m gerechnet. Bei vertikaler Bewegung wird je nach Grad der Steigung ein Zusatzbedarf von 14.7–31.7 J ME/kg LM/m veranschlagt (Clapperton, 1964; Boyne et al., 1981; Aguilera et al., 1991; Bergner und Hoffmann, 1996; Jeroch et al. 1999; Lachica und Aguilera, 2003; Shinde und Karim, 2007). Weiterhin steigert sich der Energiebedarf mit Zunahme der Steigung



(Brockway und Gessaman, 1977; Boyne et al., 1981; Aguilera et al., 1991; Bergner und Hoffmann, 1996). Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führte in einer Studie von Boyne et al. (1981) zu einem Sinken des Energiebedarfes, im Unterschied dazu, kam es bei Clapperton (1964) mit gesteigerter Geschwindigkeit zu einem erhöhten Energieverbrauch bei Schafen. Bewegungsaktivität beim Weidegang führt zwar zu einem erhöhten Energiebedarf, hilft den Tieren aber auch sich schneller zu akklimatisieren (Leiber et al., 2006).

Durch Bewegung wird eine Lipolyse verursacht, was zu einem Anstieg des Ketonkörperspiegels führt (Pethick et al., 1987). Ketonkörper können von der Muskulatur als Energiequelle genutzt werden. Auf der Alp ist ihr Anstieg ausgeprägter als im Tal (Leiber et al., 2005a). Neben der Lipolyse führt Bewegung auch zu einer gesteigerten Gluconeogenese (Judson et al., 1976). Im Blut spiegeln sich diese Stoffwechselvorgänge beim Wiederkäuer in einem erhöhten Glucose- und einem erhöhten NEFA-Wert wieder (Coulon und Pradel 1997; Coulon et al., 1998). Auch Leiber et al. (2005a) stellten, sowohl in alpinen Gebieten als auch im Flachland, bei Kühen mit Weidehaltung eine positive Korrelation zwischen Bewegungsaktivität und den NEFA fest, widersprüchlich dazu ergab eine Studie von Adewuyi et al. (2006) allerdings eine negative Korrelation zwischen den NEFA und der Bewegungsaktivität.

#### **3.6.4.2. Hypoxie**

Im Hochgebirge sinkt der Sauerstoffpartialdruck und es kommt zur Hypoxie. Um den Sauerstoffmangel zu kompensieren, steigen Herz- und Atemfrequenz an, bis sich das Tier durch vermehrte Erythrozytenbildung adaptiert hat (Bianca und Näf, 1978). Diese Akklimatisation kann individuell verschieden lang sein und richtet sich nach der Geschwindigkeit des Aufstieges, der absolut erreichten Höhe, dem relativ bewältigten Höhenunterschied und nach dem Gesundheitszustand. Symptome der Höhenkrankheit treten erstmalig ab einer Höhe von 2500 m ü.M. auf, bei einzelnen Individuen kann es aber auch schon ab 1500 m ü.M. zu Erkrankungen kommen. Höhenkrankheit beim Menschen kann sich in unterschiedlichen Formen wie Müdigkeit, Kopfschmerzen, Lethargie, Depression, Appetitlosigkeit, Kraftlosigkeit, Übelkeit usw. äussern.

Unter Sauerstoffmangel ermüden die Tiere schneller und zusätzliche Bewegung wird vermieden. Auch Bianca und Kunz (1977) sehen in der Vermeidung zusätzlicher Anstrengungen für die Futtersuche und im verringerten Appetit in der Höhe die Hauptursache für die reduzierte Futteraufnahme bei Ziegen. Bei in der Höhe gehaltenen Rindern beträgt diese Reduktion der Trockensubstanzaufnahme 100 g pro Tier und Tag (Bianca und Näf, 1978). Auch schlafen die Tiere vermehrt, was ebenfalls als eine Energiesparmassnahme angesehen wird (Bianca und Kunz, 1977). Generell wurde

festgestellt, dass Jungtiere stärker auf Höhenbelastung reagieren als ältere Tiere (Bianca und Näf, 1978). Dieses zeigt sich z.B. in einem stärkeren Abfall des Serum-Eisens und einer deutlich grösseren Steigerung der Atem- und Herzfrequenz. Allerdings können Jungtiere auch einen stärkeren kompensatorischen Ausgleich erzielen. Durch Hypoxie verursachte metabolische Effekte wirken sich auch auf andere metabolische Faktoren aus (Kreuzer et al. 1998). Christen et al. (1996) gehen allein wegen der Haltung in Höhenlagen von einem zweifach höheren Energiebedarf bei Rindern aus.

### **3.6.4.3. Extreme Klimabedingungen**

Extreme Klimabedingungen mit starken Temperaturschwankungen und extremen Kälteeinbrüchen sind typisch für alpine Gebiete. Die diurnalen Temperaturschwankungen im Gebirge verursachen Kälte- und / oder Hitzestress, was einen gesteigerten metabolischen Umsatz zur Folge hat (Bianca und Näf, 1979, Sano et al., 1995). Ausserhalb des thermoneutralen Bereiches müssen  $15 \text{ kJ ME/kg}^{0.75}$  je Tag und je  $1^\circ\text{C}$  veranschlagt werden (Bergner und Hoffman, 1996). Das entspricht ungefähr einem Wert von 3% des Erhaltungsbedarfes. Die thermoneutrale Zone beim Schaf liegt zwischen  $-10$  und  $25^\circ\text{C}$  und bei der Ziege zwischen  $6$  und  $27^\circ\text{C}$ . Witterungsverhältnisse wie Regen, Wind, Nebel, Feuchtigkeit, Temperatur, die Kondition des Tieres und der Vlieszustand üben einen wesentlichen Einfluss auf die Unter- oder Überschreitung der kritischen Temperatur aus. Innerhalb der thermoneutralen Zone (TNZ) wird die Futteraufnahme nicht beeinflusst. Bei Überschreitung der TNZ sinkt die Aufnahme, bei Unterschreiten kann sie entweder sinken oder aber ansteigen. Je nach Vlieslänge variiert der kritische Temperaturpunkt. Nach der Schur fressen Schafe, um den thermischen Verlust auszugleichen, deutlich mehr. Bei Schnee, Regen oder sehr schlammigem Boden verkürzt sich die Futteraufnahmezeit, da die Tiere weitere Wegstrecken zurücklegen müssen und länger mit der Futtersuche beschäftigt sind.

Verschiedene Versuche in Klimakammern an Rind, Schaf und Ziege zeigen eine Erhöhung der Herzfrequenz sowohl bei grosser Wärme wie auch Kälte (Bianca und Kunz, 1978; Bianca und Näf, 1979). Wenn Ziegen mit thermalem Stress konfrontiert werden, haben sie verschiedene thermoregulatorische Mechanismen, um sich anzupassen. Bei Kälte umfasst dies das Sträuben des Haarkleides, Zittern, Aufkrümmen und vermehrte Bewegung. In vergleichenden Studien von Ziegen in Höhe, Wärme oder Kälte stellten Bianca und Kunz (1978) die höchste Stoffwechselrate mit dem grössten Gewichtsverlust bei kalter Umgebungstemperatur fest. Bis zu einer Temperatur von  $-5^\circ\text{C}$  war es den Tieren möglich homiotherm zu bleiben. Auch war die Wiederkauschlagfrequenz bei Kälte am grössten, was ebenfalls auf eine erhöhte Stoffwechselrate schliessen lässt (Bianca und Kunz, 1977). Bei Wärme kam es dagegen zu den geringsten Bewegungsaktivitäten. Wie

auch schon bei der Anpassung an die Höhe reagieren Jungtiere stärker auf Kältestress als adulte Tiere und können einen wesentlich stärkeren kompensatorischen Anstieg der Wärmebildung erreichen (Bianca und Näf, 1978).

#### **3.6.4.4. Futter auf der Alp: Aufnahme und Verwertung**

Leiber et al. (2006) sehen in der Hypoxie und der spezifischen Diät durch die typische alpine Flora die Hauptursache für die Veränderungen im Stoffwechsel bei der Alpung, während die Bewegung nur eine nebensächliche Rolle spielt. In der Höhe kommt es zu einer deutlichen Abnahme der TS-Aufnahme (Bianca und Näf, 1978; Christen et al. 1996; Berry et al. 2001). Auch ist die Verdauung der NDF unter alpinen Gegebenheiten schlechter (Berry et al., 2001). Bei alpinem Heu wurden eine geringere Verdaulichkeit und ein geringerer Stickstoffgehalt festgestellt als bei Heu, welches in der Ebene geerntet wurde (Leiber et al., 2004). Kühe, die mit Alpheu gefüttert werden, haben einen höheren BHB-Gehalt im Plasma, während der Plasma-Urea-Gehalt unabhängig vom Ernteort des Heus ist (Leiber et al., 2004). Zemp et al. (1989a) zeigten in einer Untersuchung, dass laktierende Kühe allein durch Gras auf der Alp ihren Energiebedarf nicht so decken konnten, dass sie dieselbe Milchleistung wie im Tal aufrecht erhalten konnten. Auch der Phosphorbedarf kann nur schwer durch Alpgras gedeckt werden. Hinzu kommt, dass der Phosphorgehalt der Pflanzen mit fortschreitendem Vegetationsstadium abnimmt (Schubiger et al., 1999; Kirchgeßner, 2004). Calcium und Magnesium findet sich dagegen vermehrt im alpinen Wiesenfutter; auch am Albulapass wurde ein vermehrter Gehalt an Calcium in den Pflanzen festgestellt (Schubiger et al., 1999; Hüttenmoser, 2007).

## 4. Tiere, Material und Methoden

### 4.1. Versuchstiere

Für den Versuch wurden jeweils 15 weibliche Schafe und Ziegen aus der betriebseigenen Haltung des Instituts für Tierernährung der Vetsuisse Fakultät Universität Zürich verwendet. Nach den Sömmerungsvorschriften des Kantons Graubünden und der Empfehlung des Bundesamts für Veterinärwesen wurden alle Tiere vor Versuchsbeginn gegen Moderhinke, Ekto- und Endoparasiten behandelt und gegen Blauzungenkrankheit geimpft.

Das durchschnittliche Alter der 15 Schafe (Rasse: Ostfriesisches Milchschaaf) betrug  $4.7 \pm 3.3$  Jahre. Bei Versuchsbeginn wiesen die Schafe ein Gewicht von  $65.1 \pm 13.4$  kg auf.

Die 15 Ziegen (Rasse: Saanenziege) waren durchschnittlich  $5.6 \pm 2.8$  Jahre alt. Das Gewicht zu Beginn des Versuchs betrug  $67 \pm 10.9$  kg. Alle Tiere waren zu Versuchsbeginn trockengestellt.

### 4.2. Haltung und Geländebeschreibung

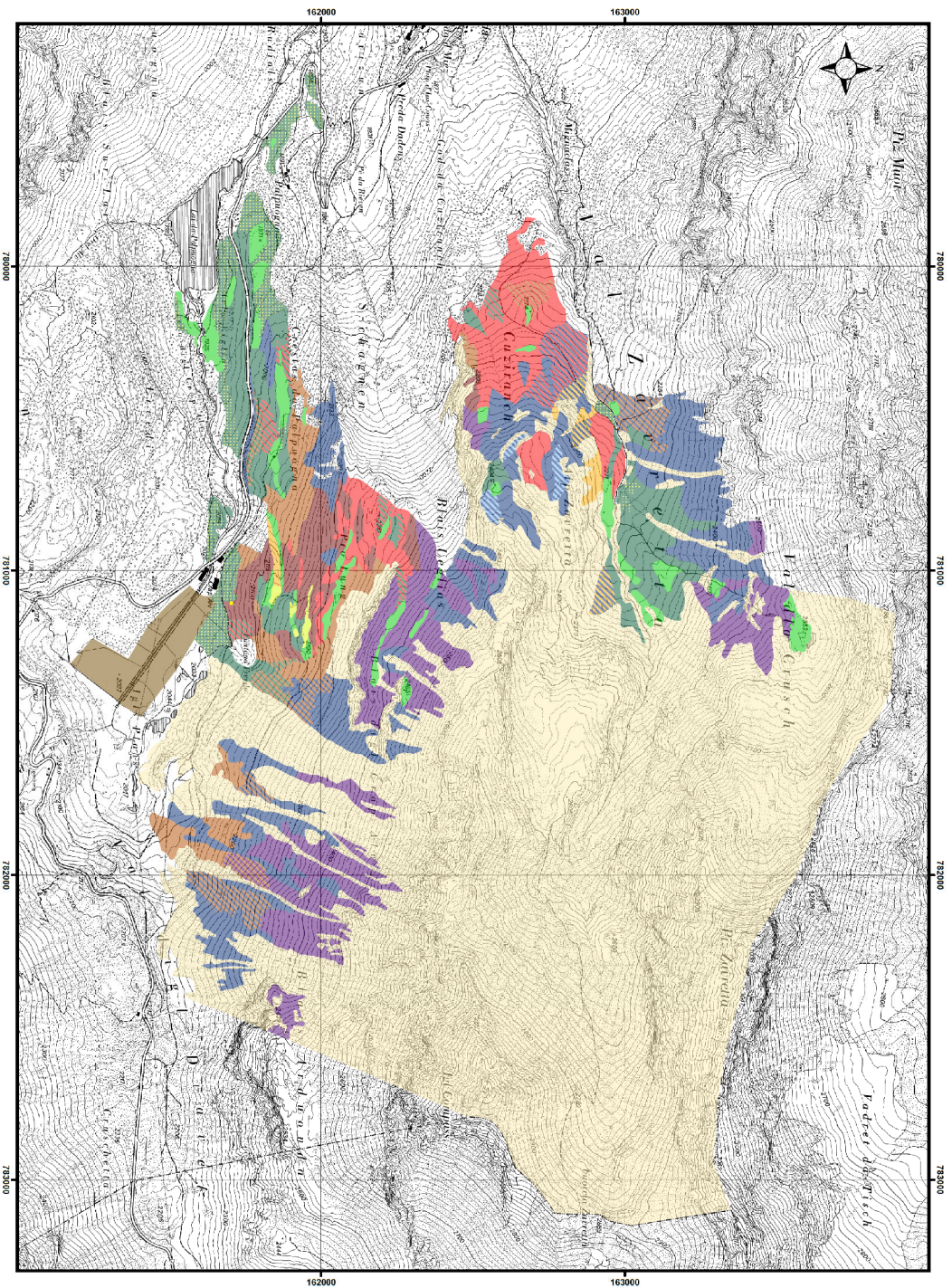
Für den Versuch wurden die Tiere von Ende Juni bis Mitte September 2008 auf dem Gelände der ETH Forschungsstation Alp Weissenstein (2026 m ü.M.) gehalten.

Die einzelnen Weideflächen auf dieser Alp sind durch Elektrozäune abgeteilt. Die Begrenzung besteht hierbei häufig nur aus einem einzelnen sehr hoch angebrachten Draht, der überwiegend als Abzäunung für Rinder und Pferde, die ebenfalls dieses Gebiet beweideten, dient. Die wesentlich kleineren Schafe und Ziegen können die Stellen, an welchen nur ein einzelner Draht ist, schon durch ein leichtes „Ducken“ des Rückens passieren.

Jeden Morgen um 7 Uhr wurden alle Tiere aus dem Stall (2026 m ü.M.) auf die Weide gelassen. Die obere Zaungrenze dieser Weide verläuft auf einer Höhe von ca. 2165 m ü.M. Bei dieser Alpweide handelt es sich um einen stetig ansteigenden Hang (Hangneigung ca. 30-40°, in oberen Anteilen noch steiler), der die südwestliche Bergseite des Igl Compass (3016 m ü.M.) darstellt. Das Gebiet befindet sich bereits über der Baumgrenze. Im unteren Drittel sind dort neben subalpinem Rasen vor allem Zwergsträucher zu finden. Die Vegetation wird mit zunehmender Höhe durch alpinen Rasen zwischen ausgedehnten Schuttfächern mit viel beweglichem Geröll ersetzt. Abbildung 9 und 10 zeigen eine geographische und eine botanische Kartierung des Versuchsgebietes.



# VEGETATIONSKARTE DER ETH-FORSCHUNGSSTATION ALP WEISSENSTEIN, ALBULAPASS (GR), 2005 Pflanzengesellschaften der Grünlandflächen



## Pflanzengesellschaften

### Fettweiden

- Alchemillo-Poetum supinae Alchinger 1933
- Deschampsio cespitosae-Poetum alpinae Heiselmayer 1982
- Fettes Crepido aureae-Festucetum rubrae Lüdi 1948
- Mageres Crepido aureae-Festucetum rubrae Lüdi 1948

### Grasweiden / Magerweiden

- Geo montani-Nardetum Lüdi 1948 em. Diel
- Trifolio thalii-Festucetum violaceae Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926
- Seslerio-Caricetum sempervirentis Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926
- Elynetum myosuroides Rübel 1911

### Subalpine Zwergstrauchweiden

- Salicetum retuso-reticulatae Br.-Bl. 1926
- Junipero-Arcrostaphyletum juniperetosum Haflter 1939
- Junipero-Arcrostaphyletum callunetosum Haflter 1939

### Sonderformen

- Caricetum davallianae trichophoretosum Dutot 1924
- Mischform aus: Cathion, Caricetum nigrae, Deschampsio cespitosae-Poetum alpinae, Crepido aureae-Festucetum rubrae
- Fels-, Schutzgesellschaften, hochalpine Rasen und Legföhrenbestände

### Quelle:

Ausschnitt aus topographischem Übersichtssplan 1:10000, Blatt 5177, reproduziert vom ALSV des Kantons Graubünden, Chur, 2005

### Autor:

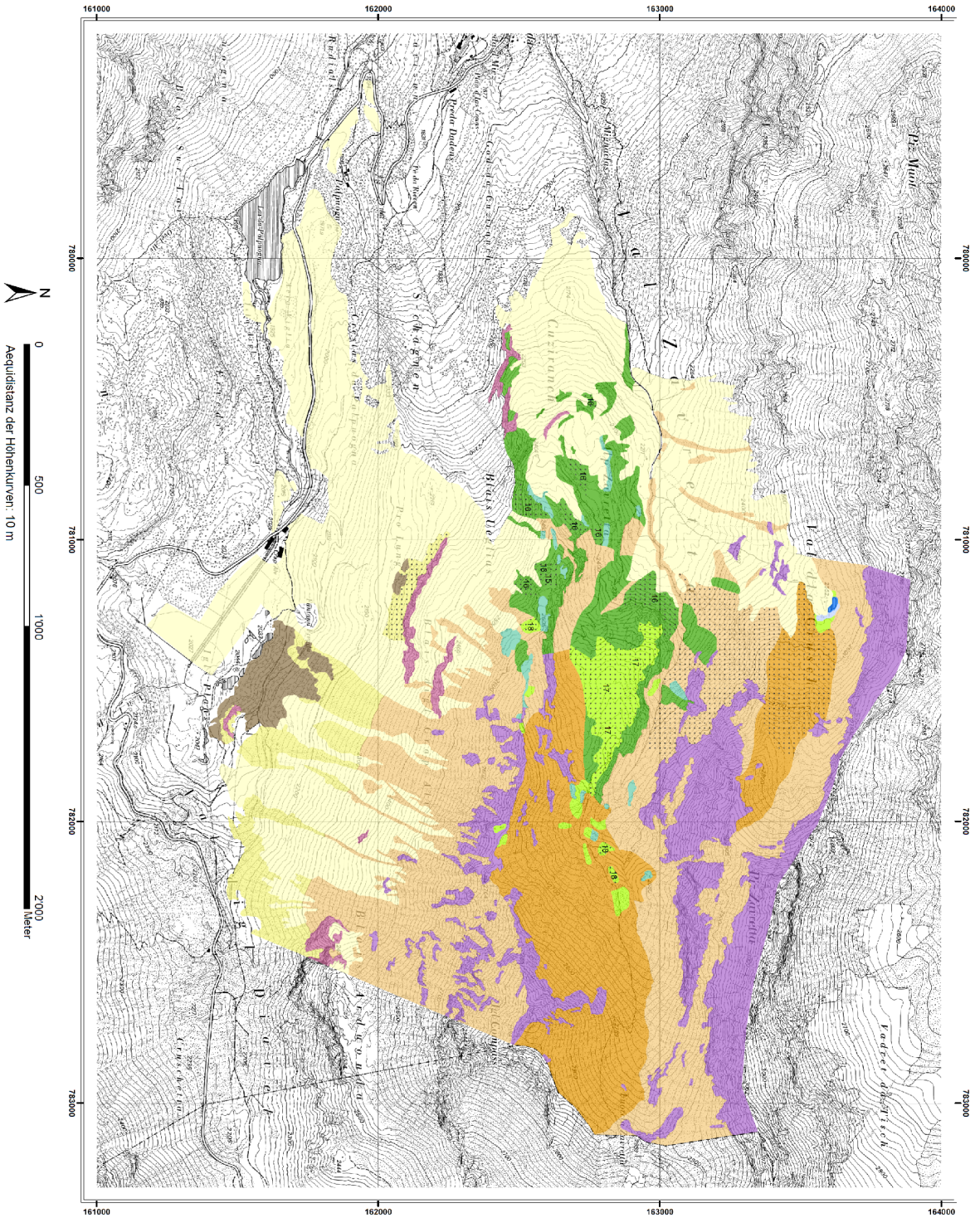
Patrick Keller  
Diplomarbeit am Geographischen Institut, Universität Zürich, 2006

Abb. 9: Vegetationskarte der Alp Weissenstein nach Keller (2006)



# VEGETATIONSKARTE ALP WEISSENSTEIN, ALBULAPASS (GR, CH)

Fels- und Schuttgessellschaften, hochalpine Rasen, alpine Feuchthochgesellschaften und Legföhrenbestände



## Legende

### Felsgesellschaften

- 1 Podettilio-Hieracium humilis Br.-Bl. 1933
- 2 Androsacetum helveticum Br.-Bl. 1918

### Schuttgessellschaften

- 3 Petasitetum paradoxum Beger 1922
- 4 Thlaspietum rotundifolium Br.-Bl. 1926
- 5 Schiefer-Schuttgessellschaft (siehe Flusnote 1)

### Hochalpine Rasen

- 6 Caricetum firmum Br.-Bl. 1926
- 7 Salicetum herbaceum Br.-Bl. 1913
- 8 Elynetum Br.-Bl. 1913

### Quellflur- und Flachmoorgesellschaften

- 9 Cratoneuro-Arabisetum bellidifoliae Koen 1925
- 10 Eriophoretum spreitzeri Rübel 1912

### Legföhrenbestände

- 11 Nagele-Ericetum Br.-Bl. 1939

### Mischformen

- 12 steinige Rasen (siehe Flusnote 2)
- 13 Thlaspietum rotundifolium, Caricetum f., Seslerio-Sempervivum, und Elynetum
- 14 Schiefer-Schuttes, Salicetum herb. und Cratoneuro-Arabis. bell.
- 15 Caricetum firmum und Elynetum
- 16 Caricetum firmum und Seslerio-Sempervivum
- 17 Salicetum herbaceum, Elynetum und Caricetum firmum
- 18 Salicetum herbaceum und Elynetum

subalpine Wiesen, Wälder und Zwergstrauchgesellschaften

- 1 Schiefer-Schuttgessellschaft bestehend aus:  
- Corynephorum canadense Br.-Bl. 1926  
- Androsacetum alpinum Br.-Bl. 1918  
- Draba Saxifragetum ssp. nova Br.-Bl. 1916
- 2 steinige Rasen bestehend aus:  
- Petasitetum paradoxum Beger 1922  
- Seslerio-Sempervivum Br.-Bl. 1926  
- Juniperio-Arabisetum Halter 1939

Samuel Schmid, 2006  
nach vegetationskundlichen Untersuchungen 2005

Koordinatenangaben in CH-1- und ESR-Koordinaten  
Kartenausschnitt aus topogr. Übersichtspl. 1:10'000, Blatt 5177, repr. vom Amt für Landwirtschaft, Strukturverbesserungen und Vermessung des Kantons Graubünden (Chur 2005)

Karte erstellt mit ESR ArcGIS 9.1 (ArcMap)

Abb. 10: Vegetationskarte der Alp Weissenstein nach Schmid (2007)

Tagsüber konnten sich die Tiere frei auf dem gesamten Gebiet bewegen, um ihr Futter zu suchen. Hierbei bestand die Möglichkeit, in tiefere Gebiete unterhalb der Baumgrenze zu ziehen.

Je nachdem wie weit die Tiere tagsüber gewandert waren, betrug die Länge des abendlichen Abtriebs 10-50 min. Der Abtrieb wurde so gestaltet, dass alle Tiere bis etwa 18 Uhr wieder im Stall für die Nacht waren. Somit hatten die Tiere einen täglichen Weidegang von 10 bis 11 Stunden.

### 4.3. Futter und Fütterung

Tagsüber hatten die Tiere unbegrenzten Zugang zur Alpweide mit frischem Grünfutter. Nachts dagegen erhielten sie kein Futter, befanden sich allerdings in einem Stall, der täglich mit frischem Stroh eingestreut wurde.

Um die Tiere morgens aus und abends in den Stall zu locken, bekamen alle 30 Tiere zusammen insgesamt 1050 g Kraftfutter (Melior Combifloc<sup>®</sup>, Haefliger AG Herzogenbuchsee, CH) pro Tag zugefüttert (ca. 35 g Kraftfutter pro Tier und Tag). Laut Hersteller enthielt das Kraftfutter folgende Inhalts- und Zusatzstoffe: TS 88%, Ra 60 g/kg, Rp 110 g/kg, Rfe 45 g/kg, Rfa 60 g/kg, APDE 85 g/kg, APDN 75 g/kg, NEL 7 MJ/kg, Ca 10 g/kg, P 5 g/kg, Mg 3 g/kg, Vit A 18900 U/kg, Vit D<sub>3</sub> 2760 U/kg, Vit E 18 U/kg.

Zusätzlich hatten die Tiere nachts im Stall freien Zugang zu Minerallecksteinen (Mineral-Lecksteine, AGROline AG, Basel, CH) und auch tagsüber auf der Weide konnten die Tiere eine aufgestellte Viehsalzmischung (KRONI, KRONI Locher + Co. AG, Altstätten, CH und Viehsalz mit Jod salines suisses du rhin, Pratteln, CH) aufnehmen.

Wasser stand den Tieren sowohl tagsüber als auch nachts zur freien Verfügung.

### 4.4. Versuchsanordnung

Bevor die Tiere auf die Alp Weissenstein gebracht wurden, wurden sie gewogen und es wurde eine Blutprobe entnommen. Ausserdem wurden bei allen Tieren die linken Metatarsalknochen an zwei unterschiedlichen Punkten mittels peripherer quantitativer Computertomographie (pQCT) untersucht (siehe Abbildung 12).

Nach einer zweiwöchigen Adaptionsphase auf der Alp wurde regelmässig alle zwei Wochen das Körpergewicht kontrolliert sowie Blutproben entnommen (Abb. 11).

Im wöchentlichen Abstand wurden Pflanzenproben von der bevorzugt gefressenen Vegetation gesammelt. Ab der siebten Woche wurde zweimal wöchentlich morgens im Stall von jeder Tierart eine Sammelkotprobe genommen (Abb. 11).

Bei den täglichen Weidegängen trugen immer dieselben sechs Tiere einer Spezies einen am Halsband befestigten GPS Empfänger (Wintec, G-Rays WBT-201, Taiwan), welcher



jeden Tag die zurückgelegte Wegstrecke dieses Tieres aufzeichnete. Diese Messungen wurden über einen Zeitraum von 10 Wochen (Beginn der Messungen in Woche 2 bis Ende Woche 11) durchgeführt (Abb. 11). Eine genauere Beschreibung der acht Messperioden erfolgt in Kapitel 5.3.

Der Alpaufenthalt der Tiere endete mit der 11. Woche, zum Anfang der 12. Woche wurden die Tiere zurück ins Tal (Tierspital Zürich, 470 m ü.M.) transportiert. Insgesamt waren die Tiere somit 12 Wochen auf der Alp (Abb. 11).

Direkt nach der Alpperiode wurde erneut Blut entnommen und die Knochendichte an den oben beschriebenen Punkten mittels pQCT gemessen. Vier Wochen nach Rückkehr von der Alp wurde eine abschliessende Blutprobe entnommen. Eine letzte pQCT-Messung erfolgte acht Wochen nach Alprückkehr.

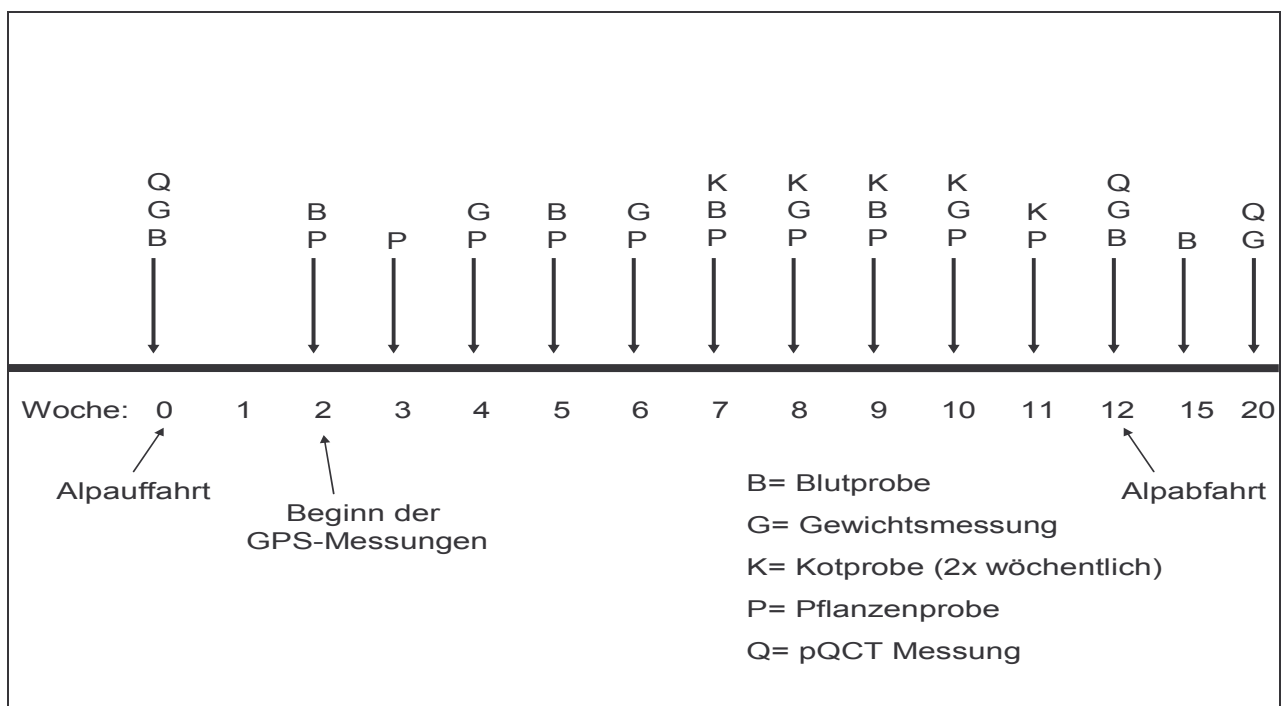


Abb. 11: Versuchsablauf in Wochen

## 4.5. GPS Daten und Auswertung

Nach einer zweiwöchigen Adaptionsphase auf der Alp erfolgte über einen Zeitraum von 10 Wochen (siehe auch 4.4.) eine GPS-Datenerhebung. Sechs Tiere jeder Spezies trugen bei den täglichen Weidegängen ein Halsband mit integriertem GPS Empfänger (Wintec, G-Rays WBT-201, Taiwan). Jede Minute wurde die geographische Position (Längengrad, Breitengrad, Höhenmeter und die zurück gelegte Distanz von letzter Position/Startposition) des Tieres durch diesen Empfänger aufgezeichnet.

Bevor die GPS-Geräte über Nacht neu geladen wurden, wurden abends jeweils die Daten der zurückgelegten Tageswegstrecke mit Hilfe der Software Time Machine X gespeichert. Anschliessend wurden die Daten mit dem Programm GPS-Track-Analyser.NET ([www.gps-freeware.de](http://www.gps-freeware.de)) bearbeitet. Die überwundenen Höhenmeter bergauf (in m), die maximal

erreichte Höhe des Tages (in m ü.M.) und die über den gesamten Tag zurückgelegte Wegstrecke (in km) wurden in eine Exceltabelle erfasst und ausgewertet.

Einzelne Tracks wurden für eine Visualisierung auf Ausschnitte GIS-basierter Vegetationskarten (Keller, 2006; Schmid, 2007) übertragen. Zum Erstellen der Karten wurde das Programm ESRI ArcGIS 9.3 (ArcCatalog 9.3 und ArcMap 9.3) verwendet. Als GIS-Basiskarte diente ein Ausschnitt aus dem topographischen Übersichtsplan 1:10.000, Blatt 5177, reproduziert vom Amt für Landwirtschaft, Strukturverbesserung und Vermessung des Kantons Graubünden (Chur, 2005).

#### 4.6. Knochendichtemessung mittels peripherer quantitativer Computertomographie

Direkt vor und nach der Alpsaison sowie acht Wochen nach Alpbefahrt wurde bei allen Tieren die Knochendichte mittels peripherer quantitativer Computertomographie (Stratec

XCT 960A, Stratec Medizinaltechnik GmbH, Pforzheim, Deutschland) gemessen.

Hierfür wurden die Tiere auf einem in der Höhe verstellbaren Tisch in linker Seitenlage gelagert. Alle Messungen erfolgten am linken Hinterbein an jeweils zwei Punkten. Der erste Scan wurde mittig an der Diaphyse des Metatarsus durchgeführt, während der zweite weiter distal auf Höhe der lateralen Bandhöcker des Metatarsus an der Epiphyse erfolgte (Abbildung 12). Neben der Knochendichtemessung erfolgte automatisch eine Messung des Knochendurchmessers. Die Messung der trabekulären Dichte wurde am distalen Messpunkt (Epiphyse) vorgenommen, während die cortikale Dichte am proximalen Messpunkt (Diaphyse) erfasst wurde (siehe Abb. 12). Die Gesamtknochendichte (totale BMD, bestehend aus Cortikalis und Spongiosa) und -masse (totale BMC) wurden sowohl proximal als auch distal gemessen. Alle Messungen erfolgten ohne Sedation der Tiere.



**Abb. 12:** Ansicht des linken Hinterfuss-Skelett vom Wiederkäuer. Markiert sind die zwei Ebenen, auf dessen Höhe die Knochendichte mittels pQCT gemessen wurde (nach Budras und Wünsche, 2002)

## 4.7. Blutentnahme und Analyse

### 4.7.1. Blutentnahme

Die Blutentnahme erfolgte jeweils vormittags vor der Fütterung bzw. vor Auftrieb auf die Weide an der Vena jugularis mittels Vacutainer-System (Vacuette® Greiner Bio-One Vacuette, St. Gallen, CH). Von jedem Tier wurden Serum- und Plasmaröhrchen (Sodium Fluoride und Lithium Heparin) gewonnen. Die entnommenen Proben wurden bei 3000 g für 10 min zentrifugiert (Sigma Laborzentrifugen, Osterode / Harz, Deutschland) und anschliessend das Serum und Plasma in verschiedene Polyethylenröhrchen (Sarstedt, Nümbrecht, Deutschland) abpipettiert. Bis zur Analyse wurde je ein Serumprobenröhrchen bei -80°C gelagert, alle restlichen Proben wurden bei -20°C tiefgefroren.

### 4.7.2. Analyse der verschiedenen Blutparameter

Folgende Parameter des Mineral-, Knochen- und Knorpelstoffwechsels wurden bestimmt: Calcium, Magnesium, Phosphor, bAP, CTX, CP-II, CTX-II, Osteocalcin, 1.25 (OH)<sub>2</sub> Vit D und 25-OH Vit D.

Folgende Parameter des Energiehaushaltes wurden bestimmt: Glucose, β-Hydroxybutyrat, Urea und Laktat.

#### 4.7.2.1. Bestimmung von Calcium (Ca), Phosphor (P) und Magnesium (Mg)

Die Analysen von Calcium (Testkit AXON00112), Magnesium (Kit DIA00600 (beide: Diatools AG, Villmergen, CH)) und Phosphor (Kit AXON00099 (AXON Lab AG, Baden, CH)) wurden mit Hilfe des Autoanalyzers (Cobas Mira Roche-Autoanalyzer, F. Hoffmann-La Roche Ltd., Basel, CH) durchgeführt.

#### 4.7.2.2. Bestimmung der knochenspezifischen alkalischen Phosphatase (bAP)

Für die Bestimmung der bAP wurde ein ELISA (Alkphase-B®, Metra Biosystems, Inc., Mountain View, USA), der mit Hilfe eines monoklonalen Anti-bAP Antikörper arbeitet, verwendet. Die optische Dichte wurde im Photometer (Multiscan RC V 1.5-0, ThermoLab Systems, Catalys AG, Wallisellen, CH) bei 405 nm bestimmt. Der im Test verwendete Antikörper ist hochaffin und selektiv gegenüber der knochenspezifischen alkalischen Phosphatase und hat eine Reaktivität von 100%. Es kommt zu einer geringen Kreuzreaktivität mit den Isoenzymen der Leber. Die Bindungsaffinität gegenüber intestinalen und plazentaren Isoenzymen ist dagegen vernachlässigbar. Bei 100 bAP U/l liegt die Interassay-Variation 5.2% und die Intraassay-Variation bei 5.0%.



#### 4.7.2.3. Bestimmung des Osteocalcin (OC)

Um das Osteocalcin zu bestimmen, wurde ein EIA Testkit (Metra<sup>®</sup>OC+EIA, Quidel Corporation, Santa Clara California, USA) verwendet. Dieser misst quantitativ das intakte OC im Serum. Für den Test wurden Osteocalcin-beschichtete Streifen genommen, ein Maus Anti-Osteocalcin Antikörper und ein Anti-Maus IgG-Alkaline Phosphate Konjugat. Die Enzymaktivität des Tracers wurde mit Tetramethylbenzidine (TMB) als Substrat bestimmt. Das verwendete Testkit hat sowohl gegenüber humanen, als auch bovinen intaktem OC eine Reaktivität von 100%. Die Intraassay- Variation liegt bei 6.2 ng/ml bei 10.0%, während die Interassay-Variation bei 9.8% liegt.

#### 4.7.2.4. Bestimmung der Serum-Crosslaps (SCL)

Die durch Osteoklasten abgebauten C-terminalen Telopeptide des Typ I Kollagen (Epitop) wurden im Serum über einen Ein-Stufen-ELISA (Serum CrossLaps<sup>®</sup> ELISA, Nordic Bioscience Diagnostics A/S, Herlev, Dänemark) gemessen. Dieser ELISA basiert auf einem Sandwichsystem mit zwei monoklonalen Antikörpern, welche bestimmte vernetzte Kollagenpeptide erfassen (Christgau et al., 1998). Die Wellenlänge konnte innerhalb von zwei Stunden unter dem Photometer (Multiscan RC V 1.5-0, ThermoLab Systems, Catalys AG, Wallisellen, CH) abgelesen werden. Während keine Spezifität des Testkits angegeben wird, liegt die Interassay-Variation bei 1.967 ng/ml bei 2.5% und die Intraassay-Variation bei 1.8%.

#### 4.7.2.5. Bestimmung des 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D (1.25 Vit D)

Für die quantitative Bestimmung des 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D aus dem Serum wurde ein Radioimmunoassay (Gamma-B 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D-RIA, Immuno-Diagnostics Systems Limited, Boldon, UK) verwendet. 500 µl der entfetteten Proben wurden mit hochspezifischen monoklonalen Antikörpern gegen 1.25 Vit D für drei Stunden inkubiert, um so kreuzreagierende Metaboliten abzutrennen. Das erhaltene Immunoextraktionsgel wurde gewaschen und in Probenröhrchen abgefüllt. Dazu wurden 200 µl Schaf-AK gegen 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D gegeben und alles über Nacht bei 2-8°C stehen gelassen. Am nächsten Tag wurden 200 µl <sup>125</sup>J-1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D dazugegeben. Nach einer erneuten Inkubationszeit von zwei Stunden bei Raumtemperatur wurde durch Zugabe des SacCel<sup>®</sup> eine Trennung von freiem und gebundenem 1.25-(OH)<sub>2</sub>-Vit D erreicht. Nun wurden die Proben noch zentrifugiert und dekantiert, bevor die Radioaktivität des ausgefallenen 1.25 Vit D mit dem Gammamatic I (Kontron Münchenstein, CH) gemessen wurde. Das verwendete Testkit wurde bereits an Ziegen getestet (Liesegang und Risteli, 2005; Liesegang et al., 2006). Die Sensitivität des Test wurde mit <8 pmol/l (3.4 pg/ml) bestimmt.

Die Präzision der Intraassay-Mittelwerte liegt bei 36.7 pmol/l bei 10.8%, die Interassay-Mittelwerte bei 20.5 pmol/l bei 13.6%.

#### **4.7.2.6. Bestimmung des 25-Hydroxy Vitamin D (25-OH Vit D)**

Zur quantitativen Bestimmung des 25-OH Vit D im Serum wurde ein ECLIA (ElektroChemilumineszenz ImmunoAssay) verwendet (Chromsystems Instruments and Chemicals GMBH München, Deutschland). Für die erste Inkubationsperiode wurden 35 µl der Serumprobe zu einem Ruthenium 2 Komplex (R2) gegeben. Das 25-OH Vit D der Probe konkurriert mit dem Biotin-Vitamin D des R2-Komplexes. Im zweiten Inkubationsschritt wurde der Komplex durch Zugabe von Streptavidin als feste Phase durch eine Biotin-Streptavidin-Reaktion gebunden. Das Reaktionsgemisch wurde in eine Messzelle übertragen, und einzelne Mikropartikel wurden durch magnetische Wirkung an der Elektrode fixiert. Alle nicht gebundenen Substanzen wurden mittels ProCell entfernt. Die durch angelegte Spannung ausgelösten Chemilumineszenzemissionen wurden im Photomultiplier (HP-1100, Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA) gemessen.

#### **4.7.2.7. Bestimmung des Prokollagen-II-Propeptid (CP-II)**

Das CP-II wurde mit Hilfe des Prokollagen-II C-Propeptide ELISA (CP-II ELISA, IBEX Technologies Inc., Montreal, Quebec, Canada) analysiert. Das Testprinzip beruht auf einem polyklonalen Antikörper gegen das Typ-II-Kollagen.

Hierfür wurde die Serumprobe mit einem CP-II-spezifischen Kaninchen-Antikörper vermischt. Nach einer 30-minütigen Inkubationszeit bei Raumtemperatur wurde alles auf eine Mikrotiterplatte, welche mit bovinem CP-II beschichtet ist, transferiert. Nach erneuter Inkubation von zwei Stunden bei Raumtemperatur wurde die Platte sechsmal gewaschen. Nun wurde eine Ziege-Anti-Kaninchen-Meerrettich-Peroxidase dazugegeben. Dieses konnte in weiteren 30 min Inkubationszeit an die Anti-Kaninchen-Antikörper auf der Mikrotiterplatte binden. Anschliessend wurde die Platte erneut gewaschen, bevor Tetramethylbenzidin dazu pipettiert wurde. Diese Farbreaktion wurde nach drei Minuten durch eine Stopp-Lösung unterbrochen und abschliessend konnte die optische Dichte bei 450 nm mit dem Photometer (Multiscan RC V 1.5-0, ThermoLab Systems, Catalys AG, Wallisellen, CH) gemessen werden. Das verwendete Testkit wurde bereits bei Schafen ausgetestet (Giezendanner, 2009).

#### **4.7.2.8. Bestimmung des carboxyterminalen Telopeptid-Fragment des Typ-II-Kollagens (CTX-II)**

Die beim Knorpelabbau entstandenen Kollagen-Typ-II Fragmente aus dem Serum wurden über einen Serum Pre-Clinical CartiLaps® ELISA (Nordic Bioscience Diagnostics A/S,

Herlev, Dänemark) nachgewiesen. Das Prinzip beruht darauf, dass zwei spezifische monoklonale Antikörper an eine Streptavidin-beschichtete Oberfläche einer Mikrotiterplatte gebunden werden und quervernetzte Fragmente des Kollagen-Typ-II erkennen. Nach gründlichem Waschen der Platten wurden jeweils 25 µl Standard, Kontrolle oder Serum mit je 100 µl Inkubationspuffer in die Platten pipettiert. Alles wurde eine Stunde bei Raumtemperatur inkubiert und anschliessend erneut gewaschen. Nach Zugabe von 100 µl Peroxidase-konjugiertem monoklonalem Antikörper erfolgte eine weitere einstündige Inkubation bei Raumtemperatur, anschliessend wurden die Platten wieder fünfmal gewaschen. Zum Starten der Farbreaktion wurde ein chromogenes Substrat dazugegeben. Nach 15 min Inkubation im Dunklen bei Raumtemperatur wurde die Farbreaktion mit 100 µl Schwefelsäure gestoppt und innerhalb von zwei Stunden wurde die Absorption im Photometer (Multiscan RC V 1.5-0, ThermoLab Systems, Catalys AG, Wallisellen, CH) bei 450 nm gemessen. Bei Schafen und Ziegen wurde dieses Testkit bisher kaum verwendet. Die Intraassay-Variation liegt bei < 7.8%, wobei die Interassay-Variation bei < 12.2% liegt.

#### **4.7.2.9. Bestimmung von Glukose, $\beta$ -Hydroxybutyrat (BHB), Lactat und Urea**

Alle Energieparameter wurden mit Hilfe des Autoanalyzers (Cobas Mira Roche-Autoanalyzer, F. Hoffmann-La Roche Ltd., Basel, CH) durchgeführt. Dabei wurden die Testkits DIA00560 (Diatools AG, Villmergen, CH) für Glukose, RB 1007 für BHB, LC 2389 für Lactat (beide: Randox, Crumlin, UK) und AXON00072 (DiaSys Diagnostic Systems GmbH, Holzheim, Deutschland) für Urea verwendet.

### **4.8. Kotprobenentnahme und Analyse**

Ab der siebten Woche wurden zweimal wöchentlich von jeder Tierart morgens im Stall frische Sammelkotproben entnommen (Entnahmezeitpunkte siehe Abb. 11). Hierfür wurde der Kot beim Abkoten mit einem Plastikcontainer abgefangen und anschliessend in Plastiktüten bis zur weiteren Analyse im Labor bei -20°C tiefgefroren.

Durch Erhitzung im Trockenofen TGA-500 (Leco Instruments, St. Joseph, MI, USA) bei 105° und 550°C wurde aus den Kotproben die Trockensubstanz (TS) und Rohasche (Ra) bestimmt. Die organische Substanz (oS) liess sich aus den gewonnenen Werten errechnen. Der Stickstoffgehalt wurde mittels CN-2000 Analyser (Leco Instruments, St. Joseph, MI, USA) ermittelt. Der Rohprotein-Gehalt (Rp) der Ausgangssubstanz ergibt sich, wenn dieser Wert mit 6.25 multipliziert wird. Die Analyse der Faserfraktionen (NDF, ADF, ADL) erfolgte mittels Fibertec System M (Foss Tecator, Höganäs, Schweden). NDF wurde über die  $\alpha$ -Amylase-Verdauung nach van Soest et al. (1991) bestimmt. ADF und ADL dagegen wurden nach der Association of Official Analytical Chemists (1997, Nr. 973.18 C

und D) determiniert. Zur Lösung der Mineralien Ca, P und Mg wurde die Rohasche mit Salzsäure versetzt und anschliessend gefiltert. Die aus der Rohasche gelösten Mineralien wurden dann wie unter 4.7.2.1. beschrieben analysiert.

#### **4.9. Pflanzenprobenentnahme und Analyse**

Die Pflanzenproben wurden jeweils dort entnommen, wo sich die Tiere zum Zeitpunkt der Probenentnahme aufhielten und fressen. Dabei wurde das Fressverhalten der Tiere genau beobachtet, um anschliessend an dieser Stelle etwas von der gerade bevorzugt gefressenen Vegetation zu sammeln. Dazu wurden die Pflanzen mit einer Schere auf Verbisshöhe abgeschnitten, in Probenütten verpackt und bis zur Analyse bei -20°C eingefroren. Die geographischen Positionen aller Probenentnahmestellen wurden mittels GPS kartiert (siehe Abb. 43). Anschliessend wurden die Werte in eine schon vorhandene botanische Kartierung der Alp Weissenstein übertragen (Keller, 2006; Schmid, 2007), um so eine genaue Vegetationsanalyse hinsichtlich der Pflanzenarten an den jeweiligen Stellen machen zu können. Das Erstellen der Karte erfolgte wie in 4.5. beschrieben.

Die Analyse der Pflanzenproben (oS, TS, Ra, Rp, N, NDF, ADF, ADL, BE, Ca, P, Mg) erfolgte nach demselben Verfahren wie es bereits bei den Kotprobenanalysen in 4.8. beschrieben ist.

#### **4.10. Klimadaten**

Für den gesamten Versuchszeitraum wurden die Niederschlags- und Temperaturdaten für das geographische Gebiet der Alp Weissenstein durch eine auf der Crap Alv installierte Wetterstation halbstündlich gemessen und aufgezeichnet (Michna et al., 2009). Neben Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperaturen wurde auch die tägliche Niederschlagsmenge gemessen. Weiterhin wurde die einfallende UV-Strahlung gemessen. Der hierbei verwendete Lichtsensor (Model CM3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) zeichnete alle 30 Minuten die Gesamtenergie der einfallenden Lichtwellenlänge im Bereich von 305 bis 2800 nm auf.

#### **4.11. Statistische Methoden**

Alle statistischen Berechnungen erfolgten mit dem Programm Systat 11 (Systat Software, inc., Point Richmond, CA 94804-2028, USA). Für die Varianzanalysen der Daten wurde eine „repeated“ ANOVA mit dem Faktor „Group“ verwendet. In der Folge wurde bei signifikanten Unterschieden ein „Kruskal-Wallis-Test“ verwendet, während der zeitliche Verlauf mit dem „Wilcoxon-Test“ berechnet wurde. Das Signifikanzniveau wurde für alle Daten bei  $p \leq 0.05$  festgelegt.

## 5. Ergebnisse

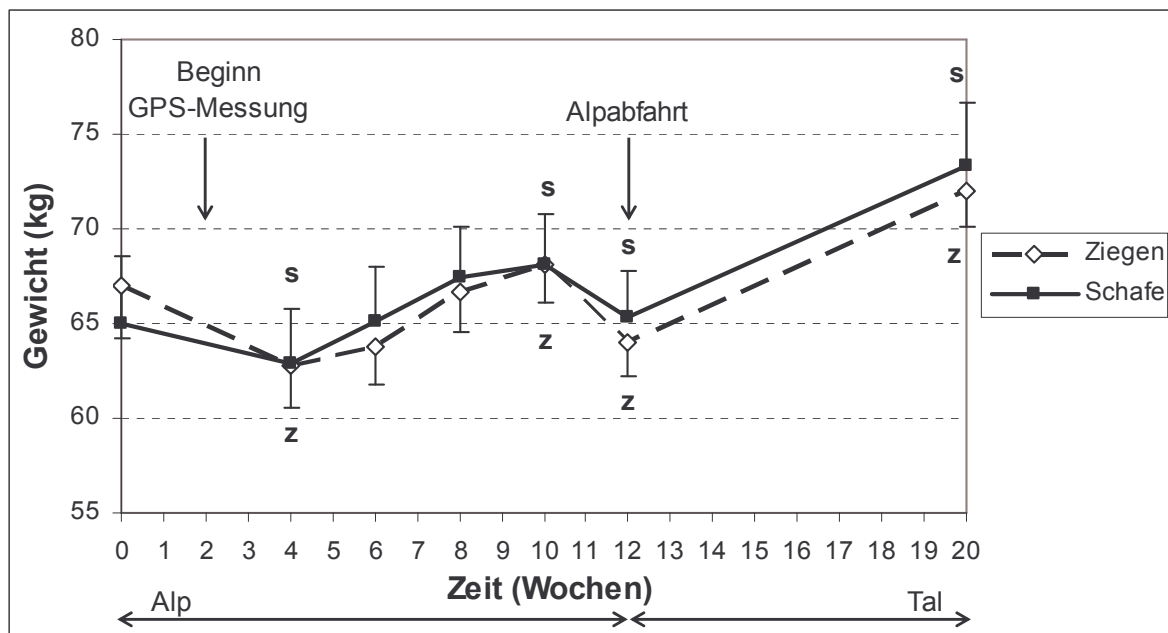
### 5.1. Allgemeines

Die folgenden Ergebnisse werden als Mittelwert mit dessen Standardfehler (STE) dargestellt.

Während des gesamten Versuchszeitraumes zeigten die Tiere keinerlei gesundheitliche Probleme. Auch die klinisch-chemischen Parameter der Blutproben lieferten keine Hinweise auf Erkrankungen der Tiere.

### 5.2. Gewichtsentwicklung

Die Gewichtsentwicklung verlief bei den Schafen und Ziegen ähnlich (Abb. 13). In den ersten vier Wochen der Alping kam es zu einer signifikanten Gewichtsabnahme ( $p = 0.001$ ). Danach stieg das Gewicht signifikant bis Woche 10 an ( $p = 0.001$ ). Von Woche (Wo) 10 bis 12 kam es erneut zu einer signifikanten Abnahme des Gewichtes ( $p = 0.001$ ). Nach Alprückkehr (Wo 12-20) nahmen die Tiere wieder signifikant zu ( $p = 0.001$ ).



**Abb. 13:** Gewichtsentwicklung; **s:** Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 0-4 ( $p = 0.001$ ), Wo 4-10 ( $p = 0.001$ ), Wo 10-12 ( $p = 0.001$ ), Wo 12-20 ( $p = 0.001$ ); **z:** Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 0-4 ( $p = 0.001$ ), Wo 4-10 ( $p = 0.001$ ), Wo 10-12 ( $p = 0.001$ ), Wo 12-20 ( $p = 0.001$ )

### 5.3. GPS-Datenerhebung

Um die einzelnen aufgezeichneten Tagesdaten auszuwerten, wurde als zeitlicher Messabschnitt das Blutentnahme-Intervall definiert. Per Definition wurde diese Zeitperiode wiederum mittig in zwei GPS-Messabschnitte unterteilt. Einzelne Tageswerte einer Messperiode wurden zu einem Durchschnittswert zusammengezogen. So ergaben sich jeweils zwei GPS-Messabschnitte zwischen zwei Blutentnahmen. Die Tage der Blutentnahme wurden nicht in den GPS-Messungen berücksichtigt, da die Tiere an diesen Tagen erst später Weidegang erhielten. Insgesamt ergaben sich so acht GPS-



Messabschnitte (Abb. 14). Da die Blutentnahmen nicht immer exakt im zweiwöchigen Abstand erfolgten, setzten sich diese Messabschnitte nicht immer aus der selben Anzahl an Tagen zusammen und überschnitten sich auch teilweise mit den Wochen des Versuches. Um trotzdem einen Vergleich mit anderen erhobenen Parametern zu ermöglichen, wurden die acht GPS-Messabschnitte den Versuchswochen zugeteilt, in die die meisten Tage des jeweiligen Abschnittes fielen (Abb. 14). Umfasste eine Messperiode gleiche Anteile von zwei Versuchswochen, wurde diese mittels Punktion gekennzeichnet. Beispielsweise enthielt die GPS-Messperiode 2.5 eine gleiche Anzahl an Tagen aus Versuchswoche 2 und 3. Nachfolgend werden die acht Messabschnitte mit Woche 2.5, 4, 5, 6, 7, 8, 9.5 und 11 bezeichnet.

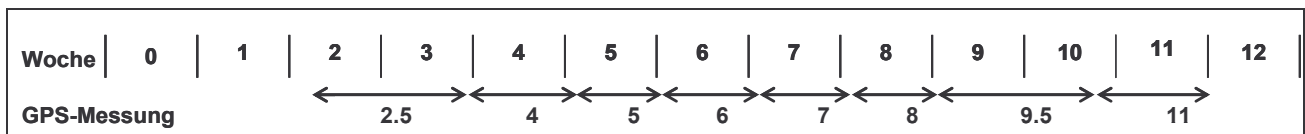


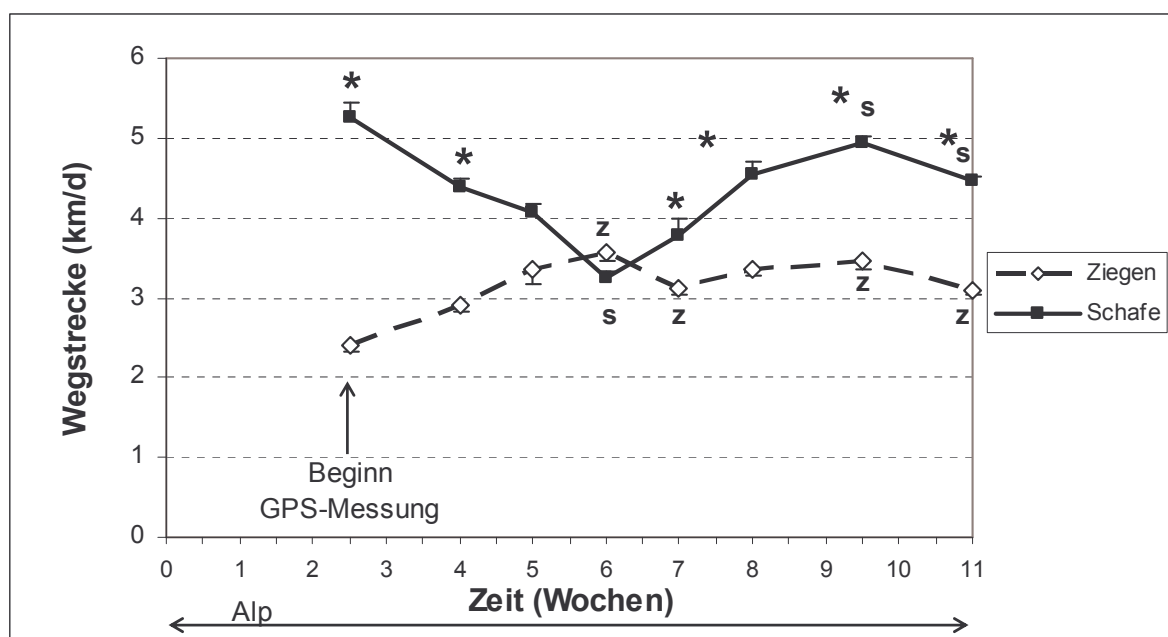
Abb. 14: Einteilung der GPS-Messperioden im Verhältnis zu den Versuchswochen

Schafe und Ziegen zeigten ein unterschiedliches Bewegungsverhalten auf der Weide. Beide Tierarten bildeten eigene Herden. Teils liefen einige Ziegen morgens mit der Schafherde mit, da die Schafe aber wesentlich schneller und höher aufstiegen als die Ziegen, hatten sich die Tiere spätestens nach zwei Stunden wieder „entmischt“. Der Herdenzusammenhang bei den Ziegen wirkte lockerer und es gab immer wieder einzelne Tiere, die sich deutlich von der Herde entfernten, um dann nach einiger Zeit wieder dazu zu stoßen. Auch die Schafherde verteilte sich oft über ein weites Gebiet, aber hier wurde nie beobachtet, dass Einzeltiere sich deutlich von der Herde absonderten.

Während des gesamten Alpaufenthaltes zogen die Schafe bei der Futtersuche in signifikant höhere Gebiete ( $p = 0.001$ ) und überwandten dabei auch signifikant mehr ( $p = 0.002$ ) Höhenmeter als die Ziegen. Im Verlauf des Tages wurde bei den Schafen ein kontinuierliches Erklimmen des Berges beobachtet, während die Ziegen nur bis zu einer gewissen Höhe gingen und dann auf dieser Ebene verweilten. Sobald es leicht regnete, hörten die Ziegen komplett auf zu fressen und drängten sich vor dem Tor zum Stall, um dann nach Ende des Niederschlages erneut den Berg hochzusteigen. Mit Fortschreiten der Saison gewöhnten sich die Ziegen zusehends an die Niederschläge und nur starker Regen hielt sie vom Fressen ab. Die Schafe dagegen liessen sich nicht vom Wetter stören und änderten auch nicht ihre Wegesroute.

Bergauf gelangten die Schafe, indem sie sich in flachen Serpentinaen den Berg hinauf bewegten. Die Ziegen taten dieses auch, bewegten sich aber teilweise in deutlich steileren Serpentinaen, manchmal sogar mehr oder weniger vertikal hinauf oder hinab, um schneller an andere Orte zu gelangen.

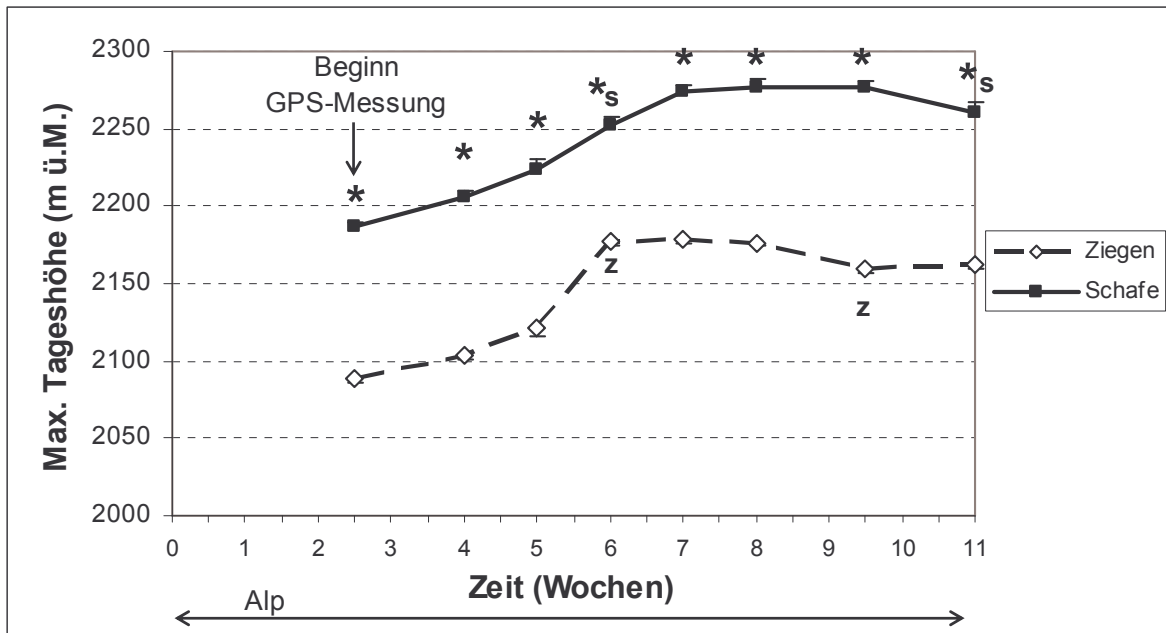
Zu Beginn der GPS-Messungen wanderten die Schafe signifikant weiter ( $p = 0.004$ ) als die Ziegen (Abb. 15). Auch in der 4. Woche der Alpengang legten die Schafe noch signifikant ( $p = 0.004$ ) mehr Kilometer zurück als die Ziegen. Während bei den Schafen die zurückgelegte Wegstrecke von Anfang der GPS-Datenerhebung bis Woche 6 signifikant abnahm ( $p = 0.043$ ), kam es in diesem Zeitraum bei den Ziegen zu einer signifikanten Zunahme ( $p = 0.028$ ) der gelaufenen Tageskilometer. Gegen Mitte des Alpaufenthaltes kam es durch diese Annäherung in Woche 6 dazu, dass die Ziegen sogar einmal eine durchschnittlich weitere Wegstrecke zurücklegten als die Schafe. Durch einen signifikanten Anstieg von der Wegstreckenlänge ( $p = 0.043$ ) von Woche 6 auf 9.5 bei den Schafen kam es im letzten Drittel der Alpperiode erneut zu signifikanten Gruppenunterschieden. Nun legten die Schafe wieder signifikant weitere Wegstrecken zurück (Wo 7  $p = 0.010$ ; Wo 8  $p = 0.004$ ; Wo 9.5  $p = 0.004$ ; Wo 11  $p = 0.004$ ). Die Ziegen liefen in Woche 7 signifikant weniger weit als in Woche 6 ( $p = 0.028$ ). Danach kam es, ähnlich wie bei den Schafen, von Woche 7 bis 9.5 zu einem signifikanten Anstieg ( $p = 0.028$ ) der Bewegungsaktivität bezüglich der zurückgelegten Wegstrecke. Anschliessend erfolgte bei beiden Tierarten ein signifikante Reduktion der Wegstrecke von Woche 9.5 auf 11 ( $p = 0.028$ ).



**Abb. 15:** Täglich zurückgelegte Wegstrecke; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 2.5-6 ( $p = 0.043$ ); Wo 6-9.5 ( $p = 0.043$ ); Wo 9.5-11 ( $p = 0.028$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 2.5-6 ( $p = 0.028$ ); Wo 6-7 ( $p = 0.028$ ); Wo 7-9.5 ( $p = 0.028$ ); Wo 9.5-11 ( $p = 0.028$ )

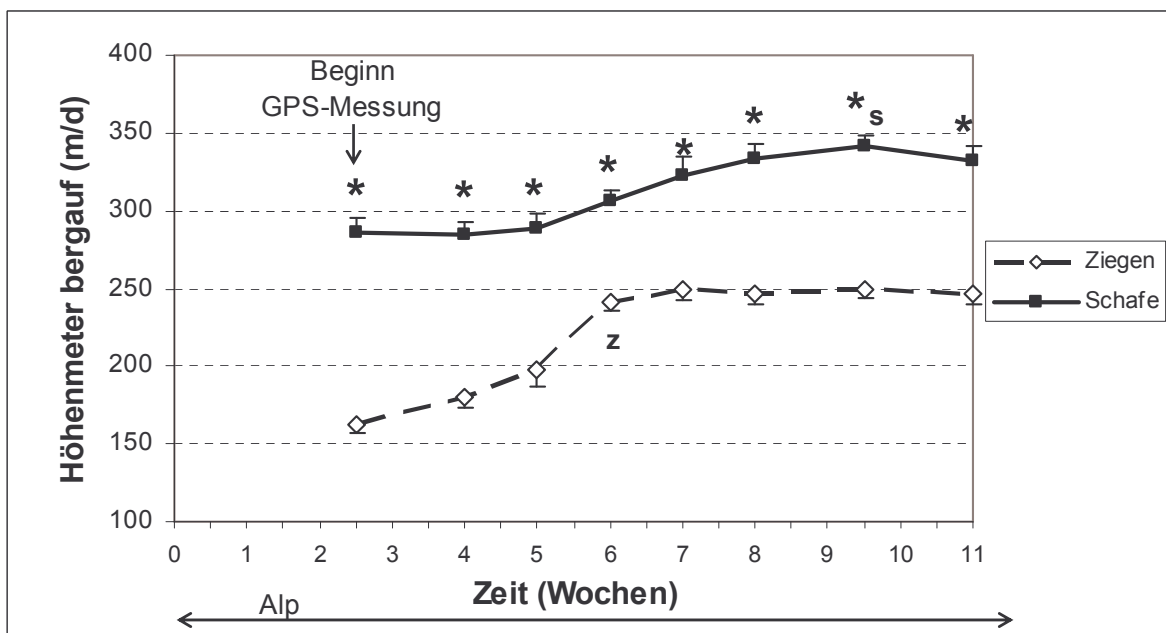
Der zeitliche Verlauf im Bezug auf den höchsten erreichten Punkt des Tages (m ü.M.) war bei beiden Spezies ähnlich (Abb. 16). Von Beginn der Aufzeichnung bis Woche 6 stiegen Schaf und Ziege immer signifikant höher den Berg hinauf ( $p = 0.003$ ). Diese Höhen behielten die Tiere dann in etwa bei. Gegen Ende des Alpaufenthaltes von Woche 9.5 bis 11 zogen die Schafe signifikant weniger weit den Berg hinauf ( $p = 0.028$ ). Gleiches

geschah auch bei den Ziegen, hier nahm das Aufstiegsverhalten allerdings schon etwas eher (ab Woche 8) signifikant ab ( $p = 0.028$ ).



**Abb. 16:** Höchster erreichter Punkt des Tages in m über dem Meer; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 2.5-6 ( $p = 0.003$ ); Wo 9.5-11 ( $p = 0.028$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 2.5-6 ( $p = 0.003$ ); Wo 8-9.5 ( $p = 0.028$ )

Ziemlich ähnlich stellte sich auch der zeitliche Verlauf der Höhenmeter, die die Tiere täglich überwunden, dar (Abb. 17). Von Woche 2.5 nach 9.5 legten die Schafe signifikant mehr Höhenmeter zurück ( $p = 0.028$ ). Auch bei den Ziegen war ein signifikanter Anstieg vom Start der Messung bis Woche 6 zu verzeichnen ( $p = 0.028$ ). Danach blieben die Werte in etwa konstant.



**Abb. 17:** Täglich überwundene Höhenmeter bergauf; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 2.5-9.5 ( $p = 0.028$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 2.5-6 ( $p = 0.028$ )

In der gesamten GPS-Messperiode legten die Schafe durchschnittlich  $4.34 \pm 0.23$  km am Tag zurück, während die Ziegen  $3.16 \pm 0.13$  km liefen. Dabei bewegten sich die Schafe täglich durchschnittlich  $311.68 \pm 8.33$  Höhenmeter bergauf, während die Ziegen nur  $221.51 \pm 12.61$  Höhenmeter bewältigten. Der Durchschnittswert der maximal erreichten Höhe betrug bei den Schafen  $2244.73 \pm 12.23$  m ü.M., die Ziegen kletterten dagegen nur durchschnittlich bis auf  $2145.63 \pm 12.75$  den Berg hinauf. Die weiteste zurückgelegte Tagesstrecke eines einzelnen Tieres betrug bei den Schafen 7.58 km und 6.35 km bei den Ziegen. Die maximale Höhe auf die ein Tier aufstieg, betrug 2363 m ü.M. bei den Schafen, während die Ziegen nur maximal 2208 m ü.M. erklommen. Auch war ein Schaf führend im Bezug auf zurückgelegte Höhenmeter; die maximal zurückgelegten Höhenmeter bergauf betrugen 485 m beim Schaf und 173 m bei der Ziege.

### 5.3.1. Aufenthaltsgebiete der Tiere

Das bevorzugt beweidete Gebiet der Versuchstiere umfasst ca. neun verschiedene Vegetationstypen (mündliche Mitteilung Schmid, 2008). Schafe und Ziegen präferierten verschiedene Weidegebiete. Die nachfolgenden Karten (Abb. 18-25) stellen beispielhaft Tracks von Schaf und Ziege für die einzelnen GPS-Messperioden dar. Für die Darstellungen wurden einzelne Tiere aus den jeweiligen Messzeiträumen ausgewählt, deren Tageswerte (zurückgelegte km, überwundene Höhenmeter, max. erreichte Höhe) den Speziesmittelwerten dieser Messperiode am ehesten entsprachen.

Die Ziegen blieben im untern Teil des Hanges und beweideten dort hauptsächlich die wacholderreichen und besenheidenreichen Zwergwacholderheiden (Abb. 18-25). Teilweise umfassten die beweideten Gebiete auch magere und fette Milkrautweiden, wobei es sich hierbei meistens um Mischvegetationen mit Zwergwacholderheide handelte. Auf reinen Milkrautweiden weideten die Tiere nur zu Anfang der Alpsaison. Ungefähr ab Mitte der Alpung hielten sich die Tiere teilweise in Blaugras-Horstseggenrasen Zonen auf, wobei es sich hier auch wieder oft um eine Mischgesellschaft mit Zwergwacholderheide handelte. Die Ziegen zogen nicht in die Wald- und Buschgebiete der Alp, weiterhin wurden Flächen mit Borstgras-, Lägerrispen-, Rasenschmielenrasen, Feuchtgebiets-, Fels- und Schuttgesellschaften gemieden (Abb. 18-25).

Die Schafe zogen in höhere Gebiete als die Ziegen (Abb. 18-25). In diesem Bereich hielten sich die Tiere primär im Blaugras-Horstseggenrasen mit Fortschreiten der Alpsaison auch im Violettschwingelrasen auf. Diese einzelnen alpinen Rasenzonen sind von Schuttfächern mit Fels- und Schuttgesellschaften durchzogen. Die Schafe verweilten



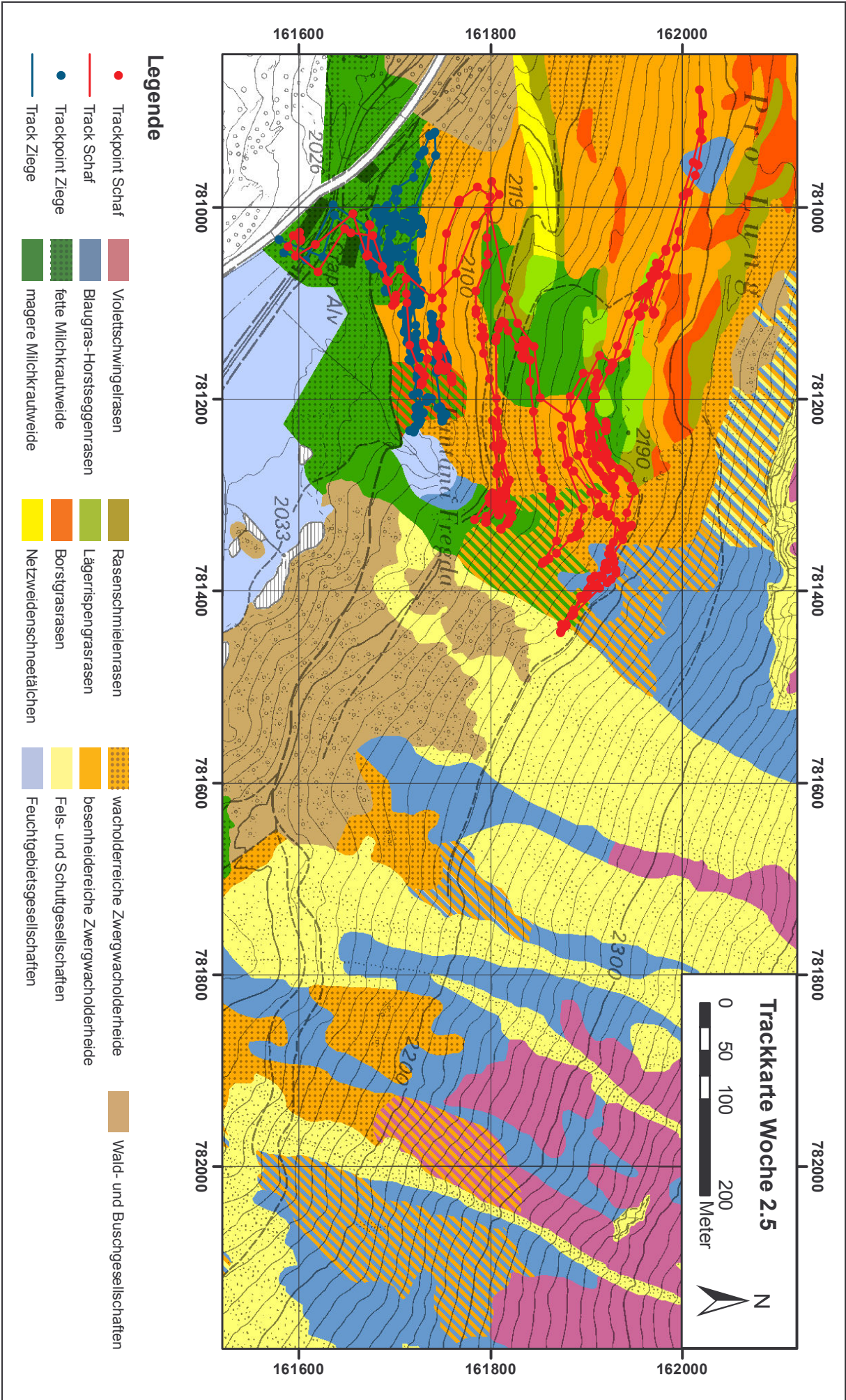


Abb. 18: Beispieltrack von einem Schaf und einer Ziege in GPS-Messperiode 2.5 in botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)



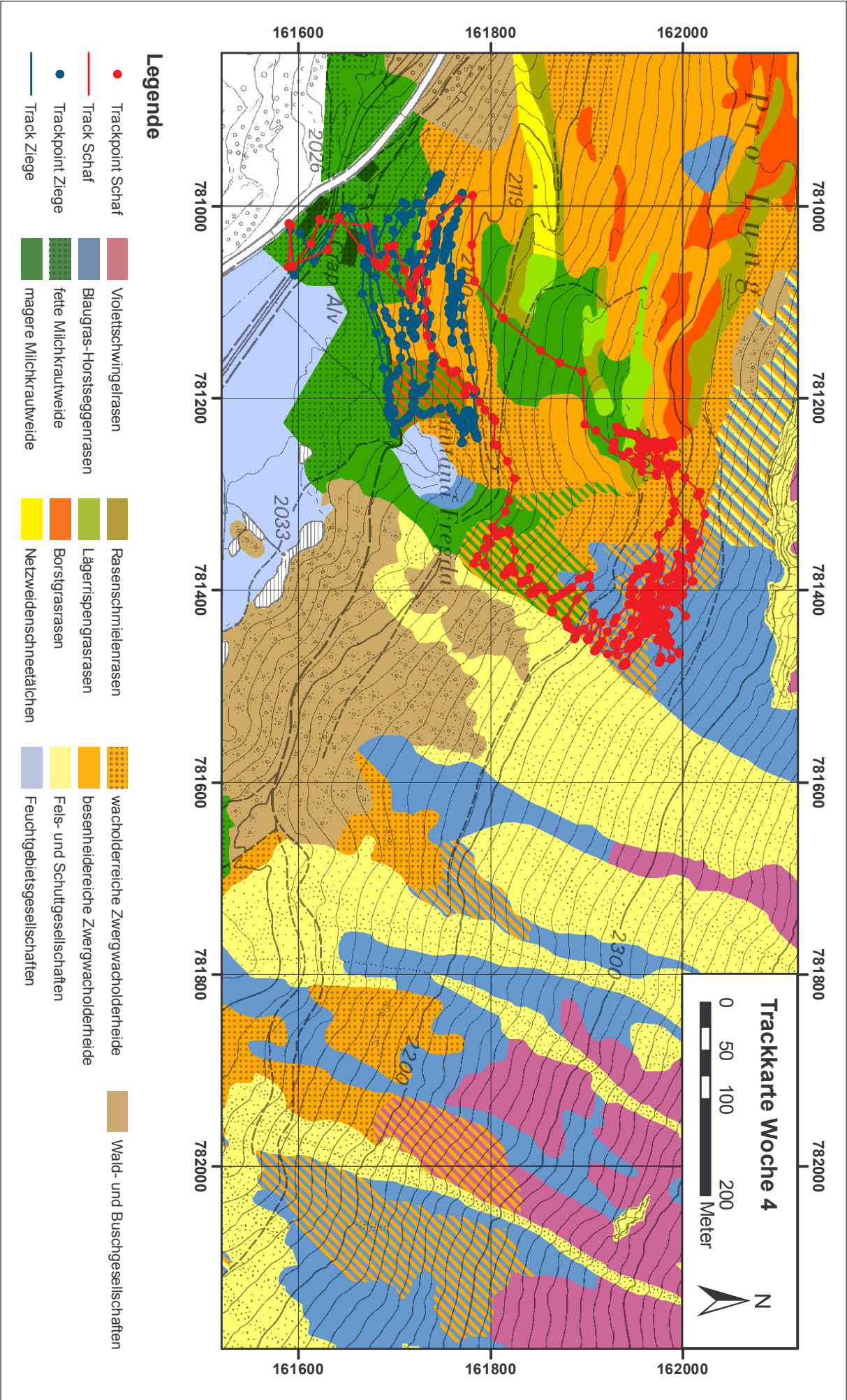


Abb. 19: Beispieltrack von einem Schaf und einer Ziege in GPS-Messperiode 4 in botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)



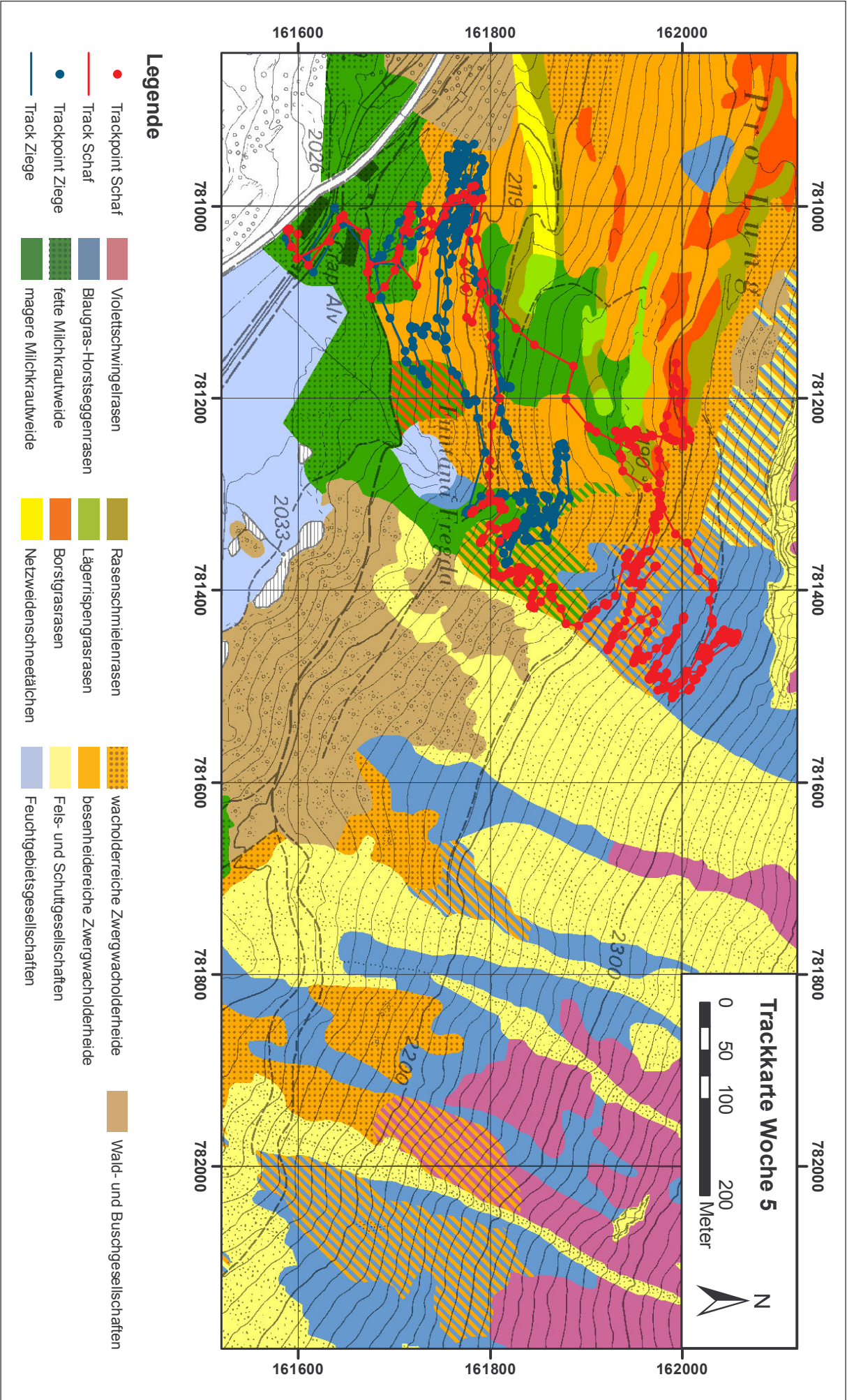


Abb. 20: Beispieltrack von einem Schaf und einer Ziege in GPS-Messperiode 5 in botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)



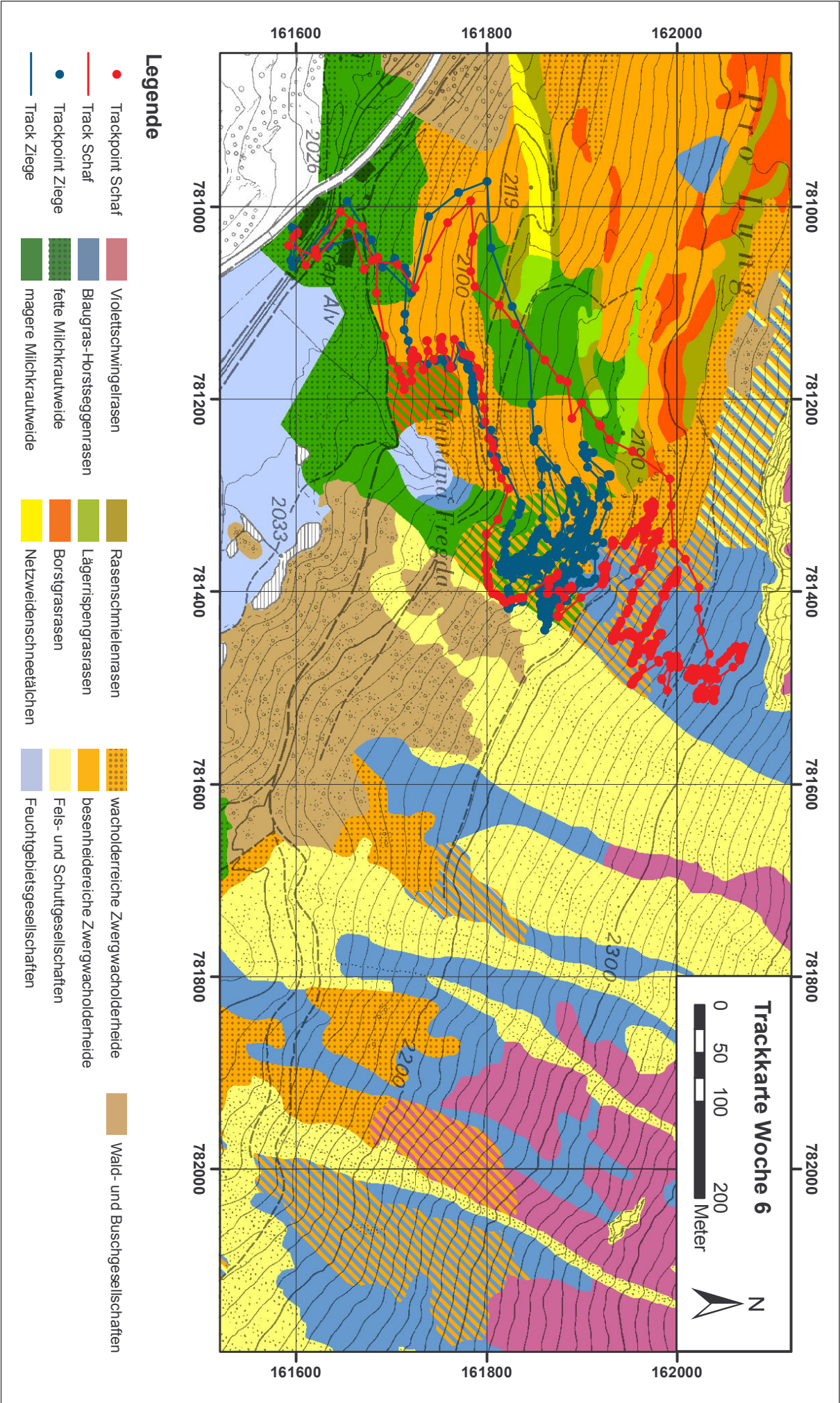


Abb. 21: Beispieltrack von einem Schaf und einer Ziege in GPS-Messperiode 6 in botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)



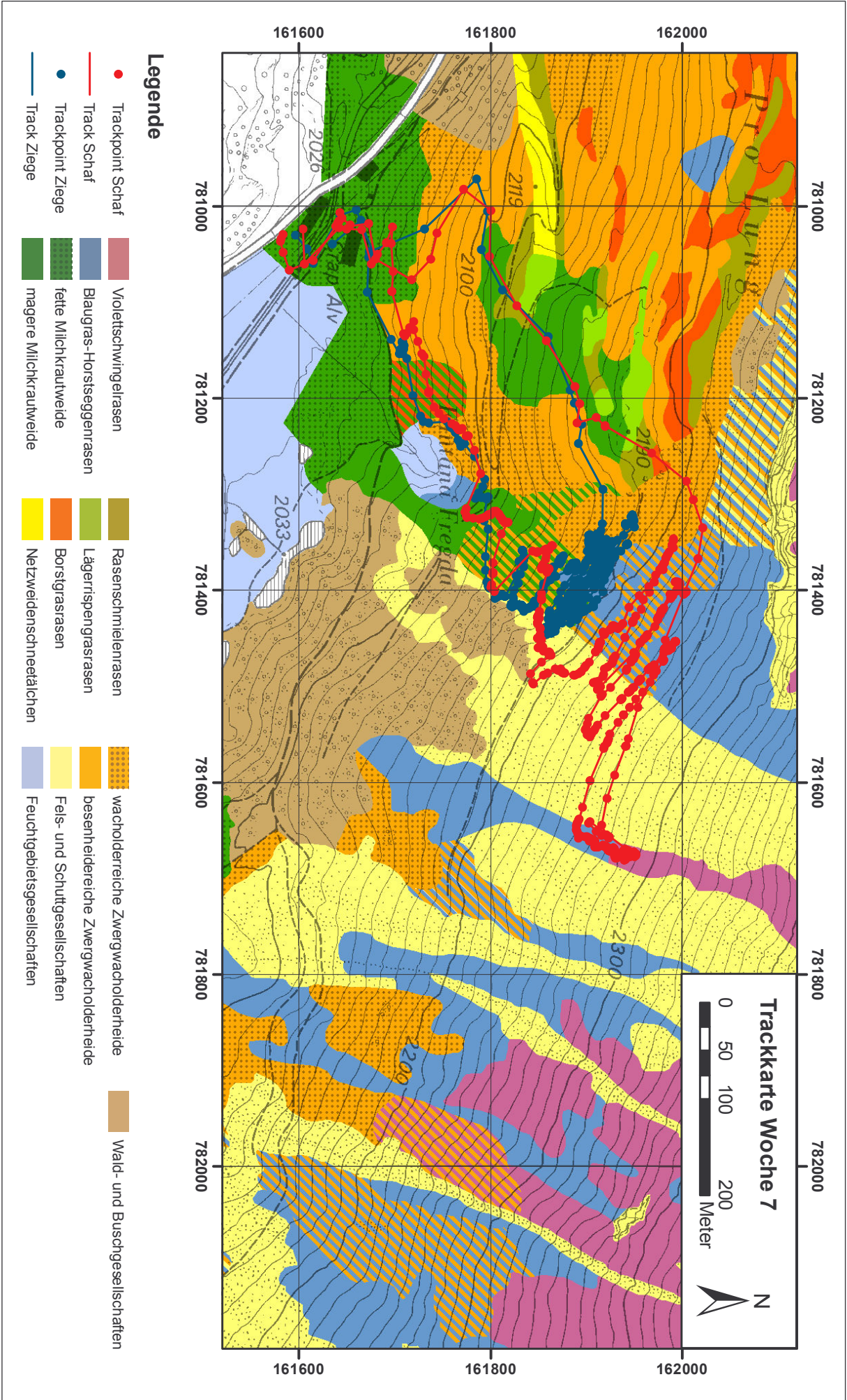


Abb. 22: Beispieltrack von einem Schaf und einer Ziege in GPS-Messperiode 7 in botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)



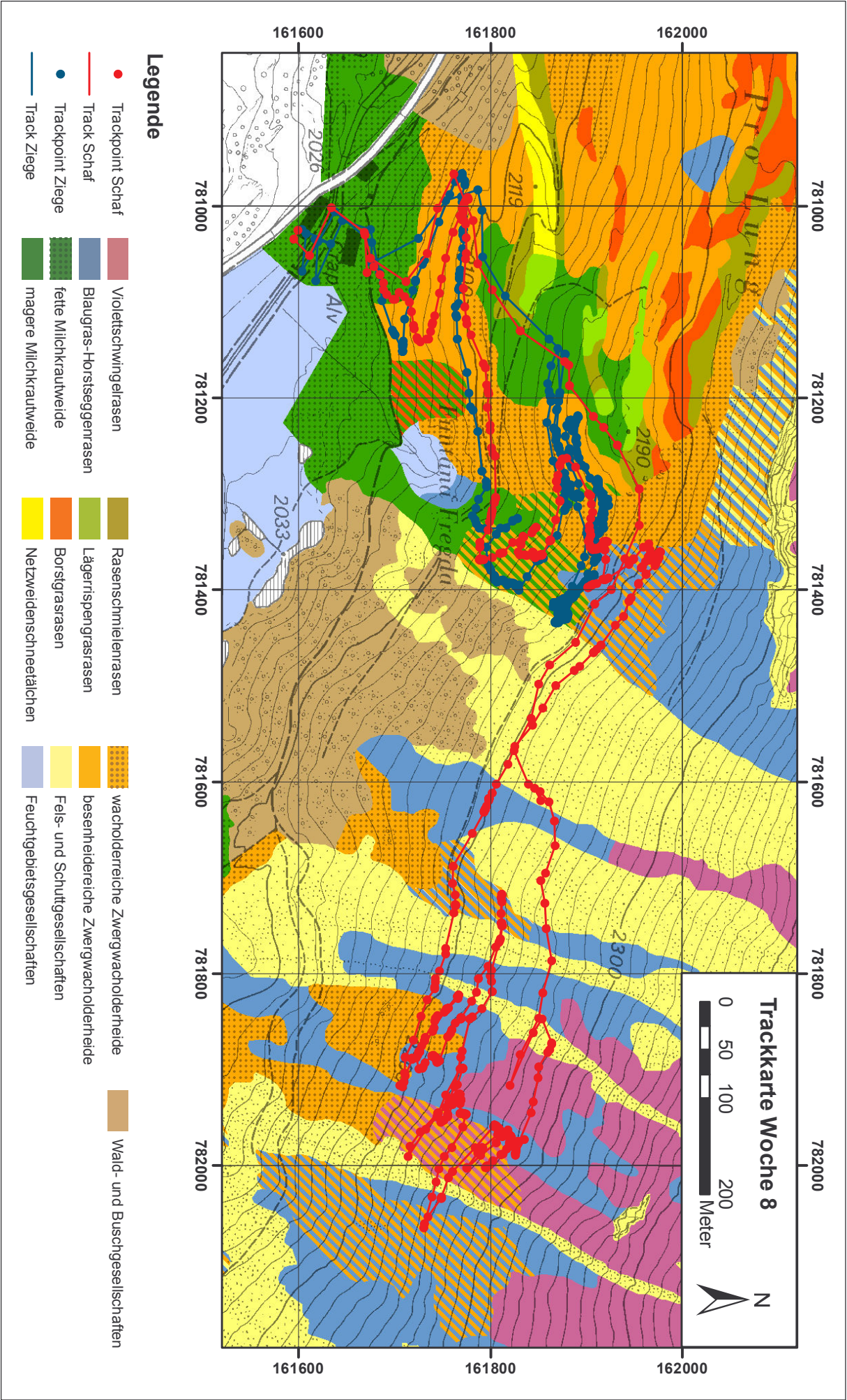


Abb. 23: Beispieltrack von einem Schaf und einer Ziege in GPS-Messperiode 8 in botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)



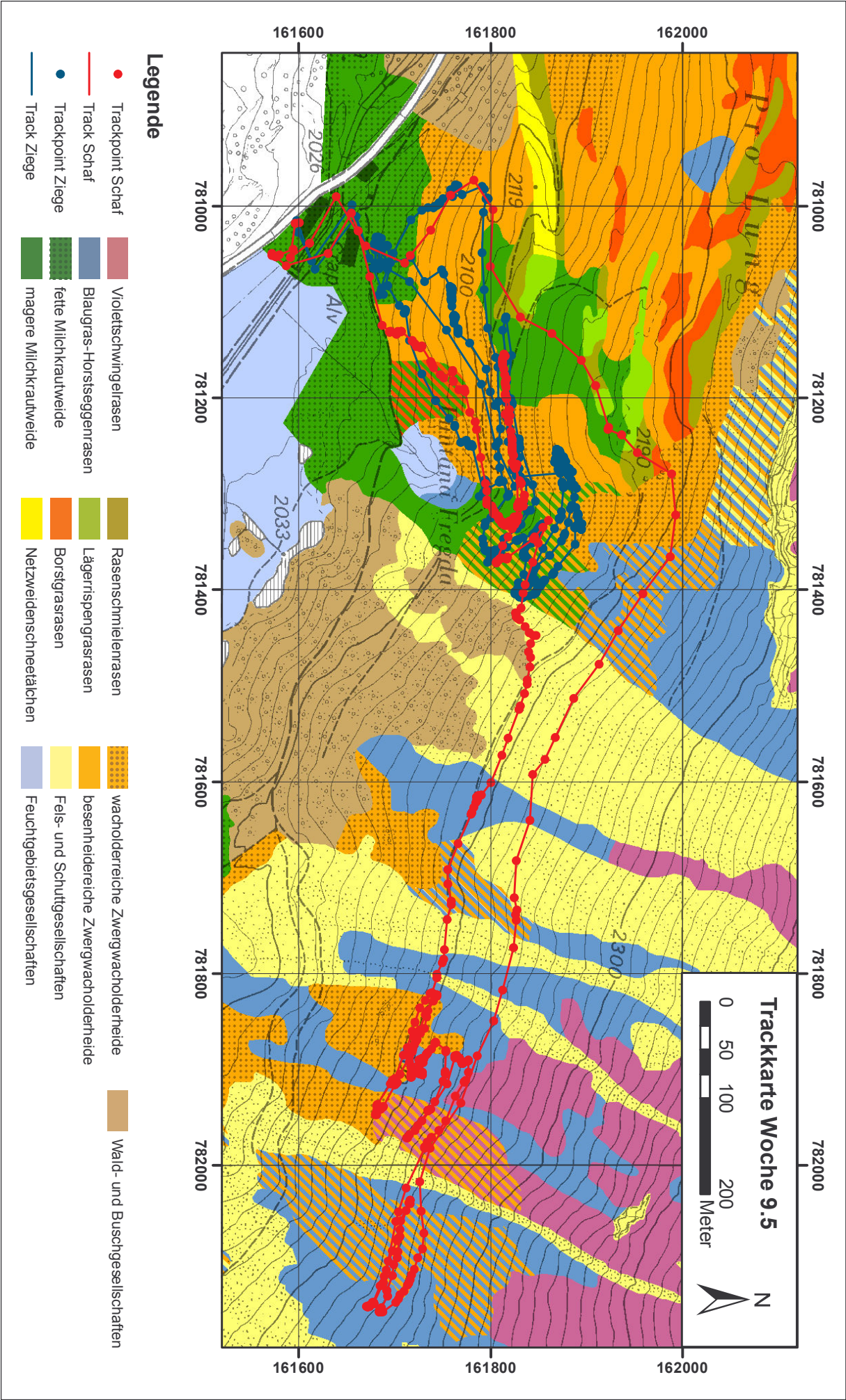


Abb. 24: Beispieltrack von einem Schaf und einer Ziege in GPS-Messperiode 9.5 in botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)



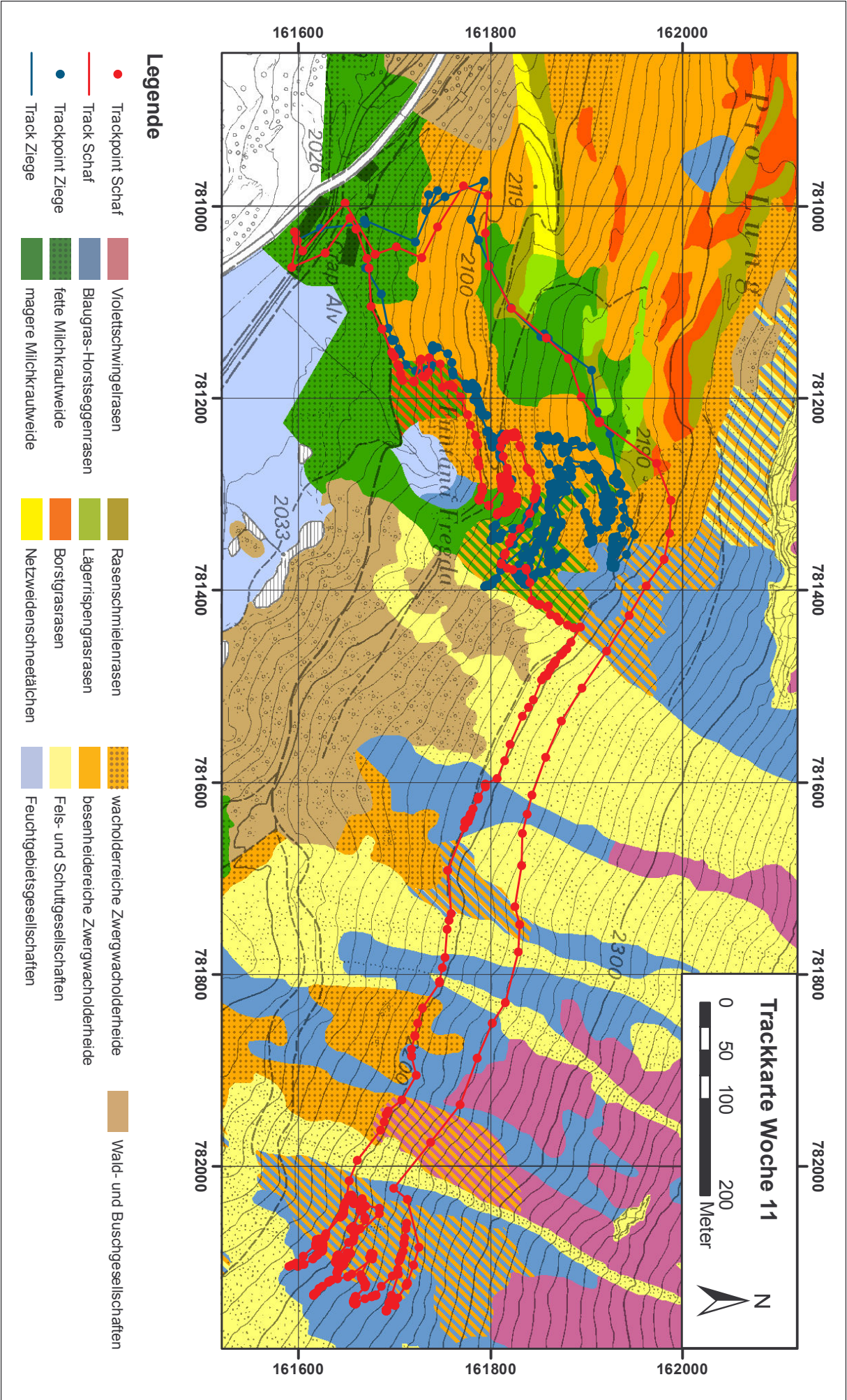


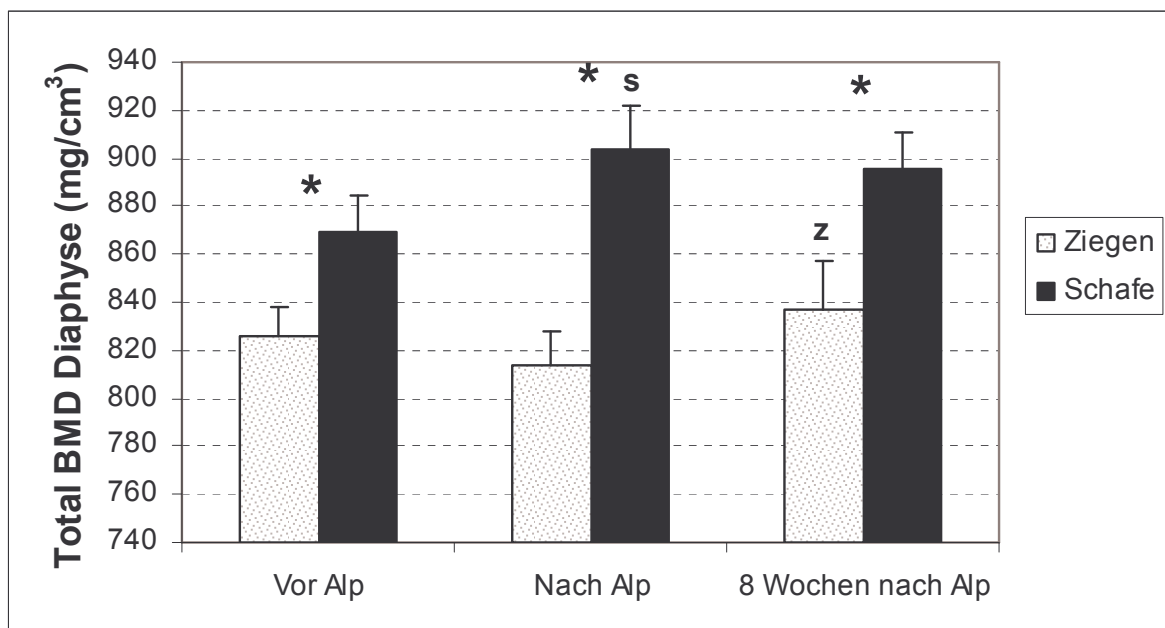
Abb. 25: Beispieltrack von einem Schaf und einer Ziege in GPS-Messperiode 11 in botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)

zwar nicht sehr lange in diesen Gebieten, frassen aber mit Vorliebe von der vorhandenen Vegetation. Bei ihrem Aufstieg zu den Blaugras-Horstseggenrasen-Gebieten passierten die Schafe täglich zwangsläufig die Gebiete der Zwergwacholderheiden und verweilten hier einige Zeit. Gerade zu Anfang der Alpzeit hielten sich die Tiere viel sowohl in besenheidenreichen wie auch wacholderreichen Zwergwacholderheiden auf. Die beweideten alpinen Grasazonen waren oft ebenfalls Mischformen mit der Zwergwacholderheide. Ein Beobachten der Tiere in diesen Gebieten zeigte aber, dass es die Schafe dort primär auf die Gräser und Kräuter zwischen den Kleinsträuchern abgesehen hatten, verholzte Pflanzen wurden dagegen grösstenteils gemieden. Des Weiteren verweilten die Tiere bei ihrem Aufstieg auch gerne eine gewisse Zeit in mageren Milchkrautweiden. Zu Anfang der Alpung beweideten die Schafe auch für kurze Tagesabschnitte Lägerispengras- und Rasenschmielenrasen. Borstgrasrasen sowie Feucht-, Wald- und Buschgebiete wurden nicht aufgesucht (Abb. 18-25).

## 5.4. pQCT-Messungen

### 5.4.1. Messung der Knochendichte (BMD)

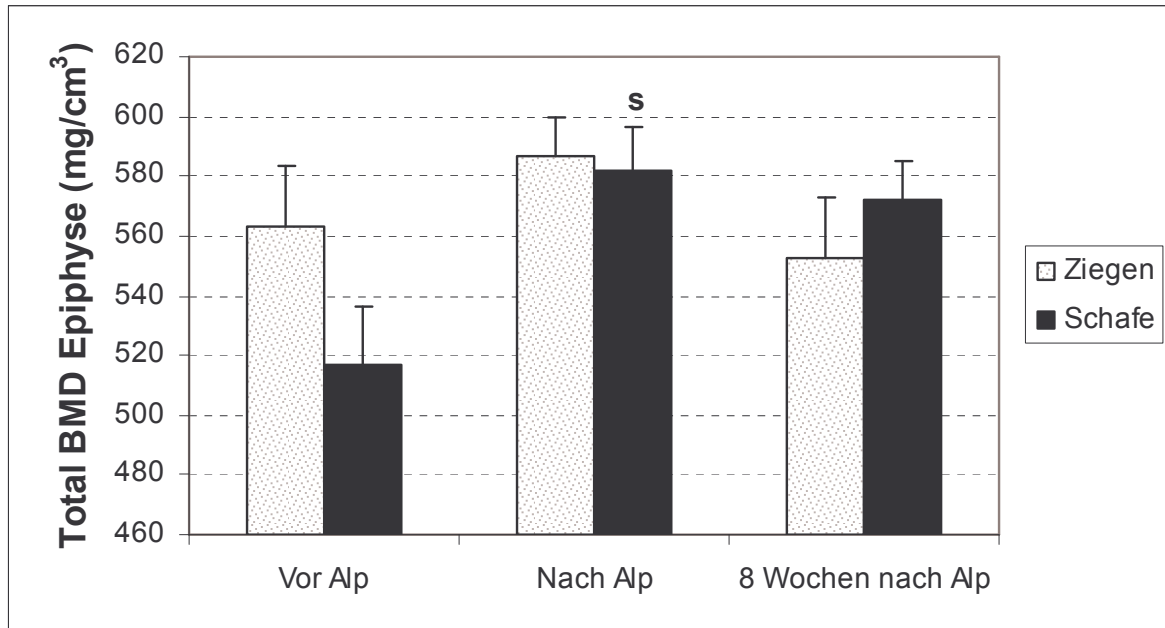
#### 5.4.1.1. Gesamtknochendichte an Dia- und Epiphyse



**Abb. 26a:** Gesamtknochendichte (BMD) an der Diaphyse; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe von vor bis nach Alp ( $p = 0.036$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen von nach bis 8 Wochen nach Alp ( $p = 0.009$ )

Die mittlere totale BMD an der Epiphyse war bei den Schafen stets höher als bei den Ziegen ( $p = 0.019$ ). Dagegen war bei den Messungen an der Diaphyse kein signifikanter Gruppenunterschied sichtbar (Abb. 26a). Die Alpung führte bei den Schafen zu einer signifikanten Zunahme ( $p = 0.036$ ) der totalen BMD an der Diaphyse. Während des Alpaufenthaltes zeigten die Ziegen dagegen keine signifikanten Änderungen der totalen

BMD. Erst nach Alpabfahrt, d.h. wieder im Tal, wiesen die Tiere eine signifikant höhere ( $p = 0.009$ ) totale BMD an der Diaphyse auf.



**Abb. 26b:** Gesamtknochendichte (BMD) an der Epiphyse; **s:** Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe von vor bis nach Alp ( $p = 0.015$ )

Ähnliche Ergebnisse konnten an der Epiphyse gezeigt werden (Abb. 26b). Auch hier stieg die totale BMD bei den Schafen während der Alpung signifikant an ( $p = 0.015$ ), während dies bei den Ziegen nicht der Fall war. Im Tal (nach der Alpung) dagegen zeigte die Ziegengruppe eine Tendenz ( $p = 0.084$ ) zu höheren Knochendichten an der Epiphyse.

#### 5.4.1.2. Trabekuläre und cortikale BMD

Sowohl die Messung der trabekulären (gemessen an Epiphyse) als auch der cortikalen BMD (gemessen an Diaphyse) ergab keine signifikante Veränderung im zeitlichen Verlauf. In der cortikalen Dichte zeigte sich von vor bis nach der Alp (Wo 0-12) beim Schaf eine Tendenz zur Zunahme ( $p = 0.100$ ). Schaf und Ziege unterschieden sich in der cortikalen BMD zu allen Zeitpunkten signifikant ( $p = 0.013$ ). Hierbei wiesen die Schafe im Vergleich zu den Ziegen stets eine höhere cortikale Dichte auf. Genaue Werte sind in Tabelle 4 aufgelistet.

**Tab. 4:** Mittlere trabekuläre und cortikale Knochendichte (BMD)  $\pm$  STE

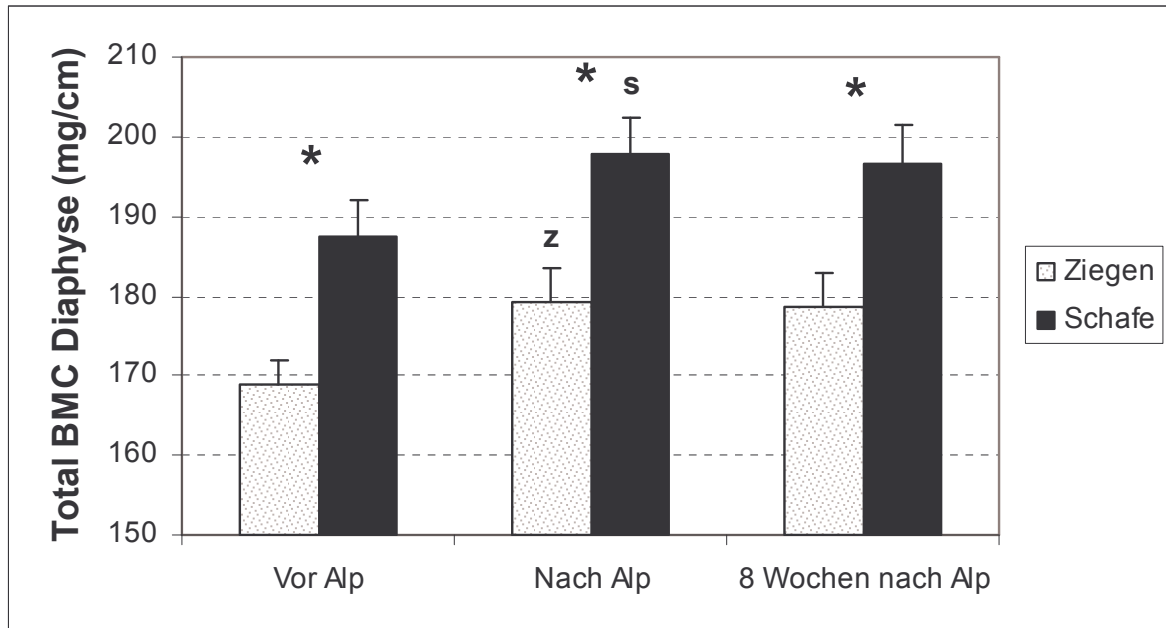
Woche	Trabekuläre BMD (mg/cm <sup>3</sup> )			Cortikale BMD (mg/cm <sup>3</sup> )		
	0	12	20	0	12	20
<b>Schafe</b>	324.50 $\pm 11.77$	333.21 $\pm 13.01$	298.65 $\pm 19.96$	1284.13 $\pm 10.30$	1300.45 $\pm 10.34$	1294.80 $\pm 9.70$
<b>Ziegen</b>	353.38 $\pm 11.06$	342.74 $\pm 16.56$	313.08 $\pm 17.09$	1251.18 $\pm 6.15$	1257.39 $\pm 6.53$	1261.99 $\pm 6.62$
<b>p Gruppe*</b>	-	-	-	$p = 0.011$	$p = 0.004$	$p = 0.017$

\* Signifikanter Gruppenunterschied



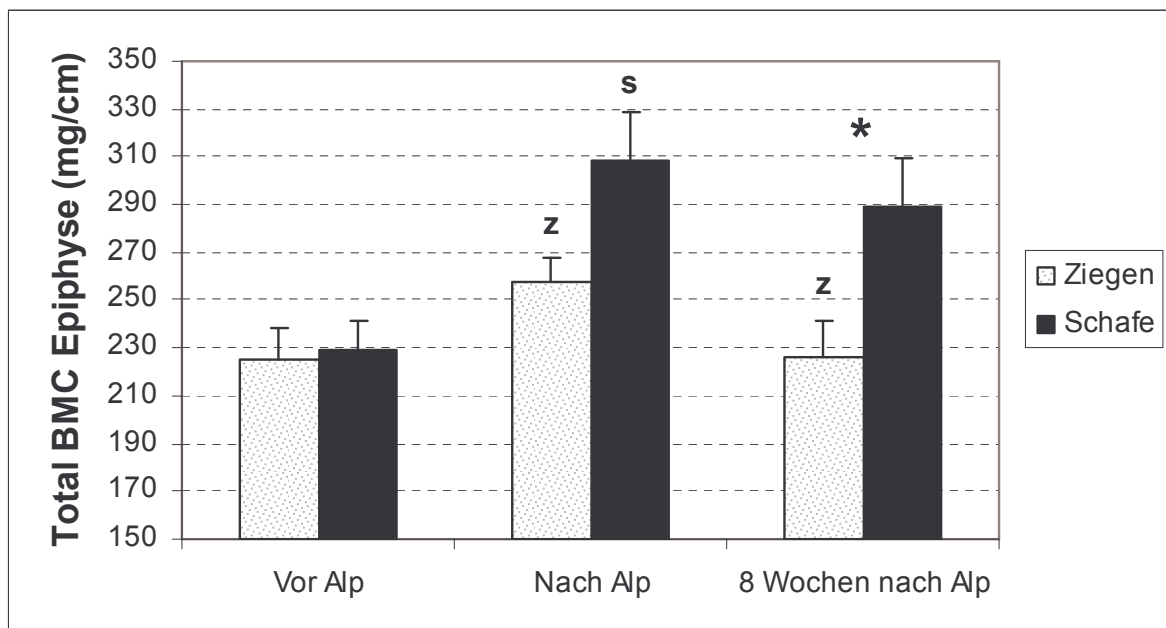
## 5.4.2. Messung der Knochenmasse (BMC)

### 5.4.2.1. Gesamtknochenmasse an Dia- und Epiphyse



**Abb. 27:** Gesamtknochenmasse (BMC) an der Diaphyse; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe von vor bis nach Alp ( $p = 0.001$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen von vor bis nach Alp ( $p = 0.001$ )

Die mittlere Knochenmasse stieg von vor bis nach der Alp sowohl an der Epiphyse (Abb. 28) wie auch an der Diaphyse (Abb. 27) signifikant an (Schaf: Diaphyse  $p = 0.000$ ; Epiphyse  $p = 0.003$ ; Ziege: Diaphyse  $p = 0.001$ ; Epiphyse  $p = 0.047$ ). Bei den Messungen distal an der Epiphyse nahm nach Alpfahrt bis acht Wochen nach Alp der mittlere BMC bei den Ziegen wieder signifikant ab ( $p = 0.050$ ).

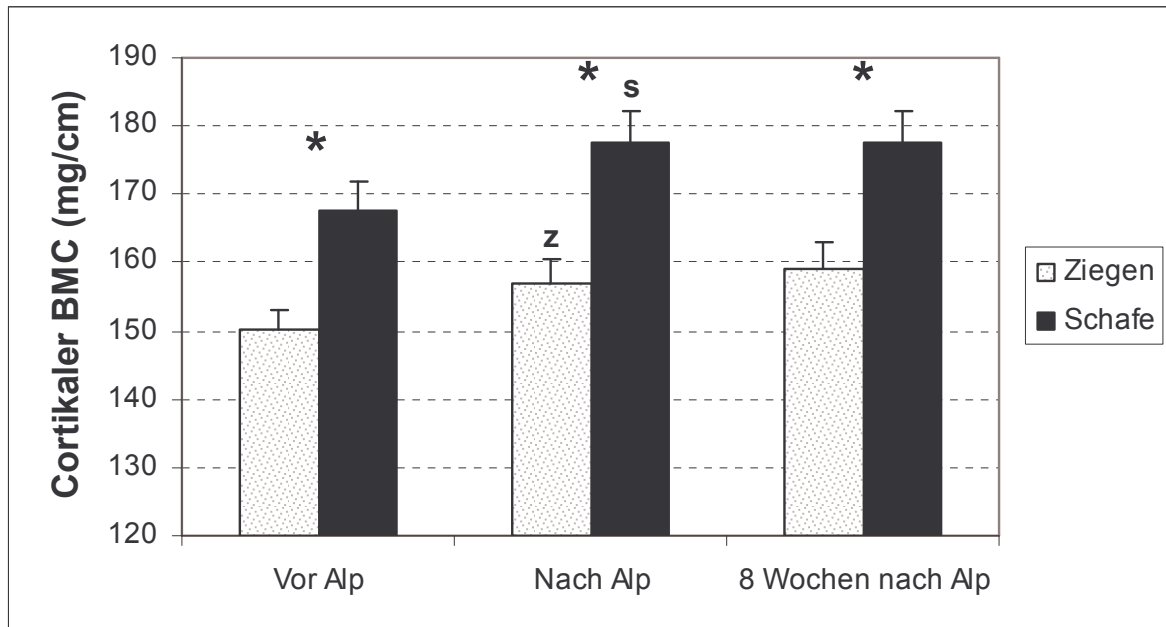


**Abb. 28:** Gesamtknochenmasse (BMC) an der Epiphyse; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Zeitlich signifikanter Verlauf Schafe von vor bis nach Alp ( $p = 0.003$ ); z: Zeitlich signifikanter Verlauf Ziegen von vor bis nach Alp ( $p = 0.047$ ); von nach Alp bis nach 8 Wochen nach Alp ( $p = 0.050$ )



Auch bei den Schafen zeigte sich hier eine Tendenz ( $p = 0.182$ ) zur Reduktion des BMC. Auch am proximalen Messpunkt an der Diaphyse sanken die Werte leicht ab. Die Schafe wiesen im Vergleich zu den Ziegen stets einen höheren mittleren BMC auf. Signifikant war dieser Unterschied bei allen Messungen an der Diaphyse ( $p = 0.005$ ) und bei der Messung acht Wochen nach dem Alpaufenthalt an der Epiphyse ( $p = 0.007$ ).

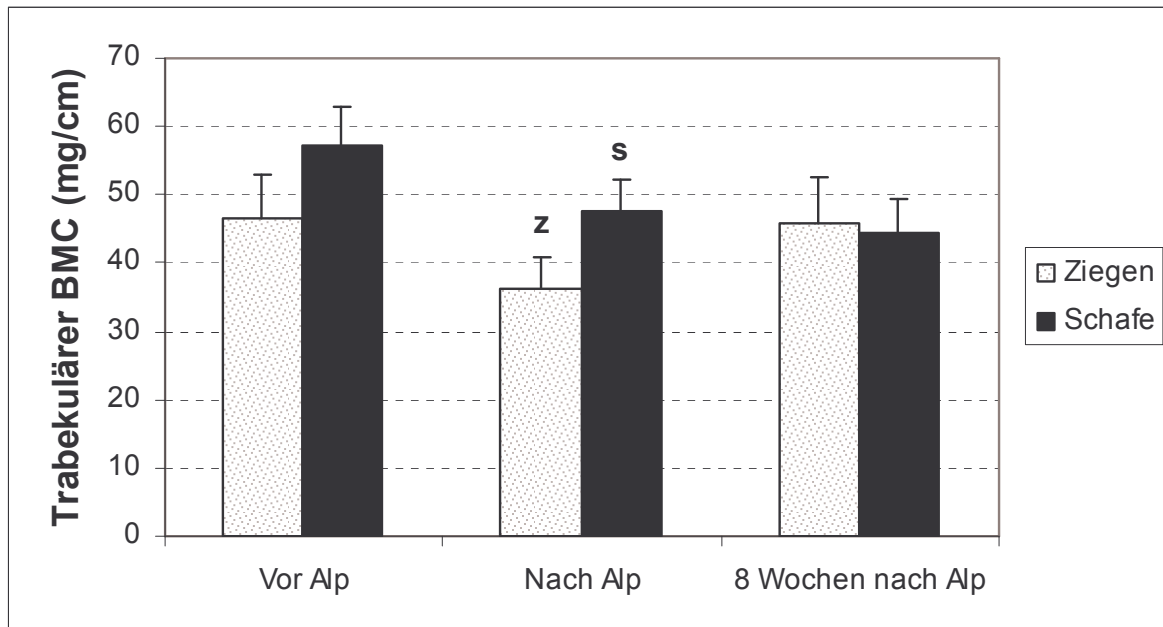
#### 5.4.2.2. Trabekulärer und cortikaler BMC



**Abb. 29:** Cortikale Knochenmasse (BMC) gemessen an der Diaphyse; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe von vor bis nach Alp ( $p = 0.001$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen von vor bis nach Alp ( $p = 0.001$ )

Wie bei den Messungen des totalen BMC hatten die Schafe immer einen signifikant höheren cortikalen BMC (gemessen an der Diaphyse;  $p = 0.002$ , siehe Abb. 29). Nur bei der Messung vom trabekulären BMC (gemessen an der Epiphyse) gab es keinen signifikanten Gruppenunterschied (Abb. 30).

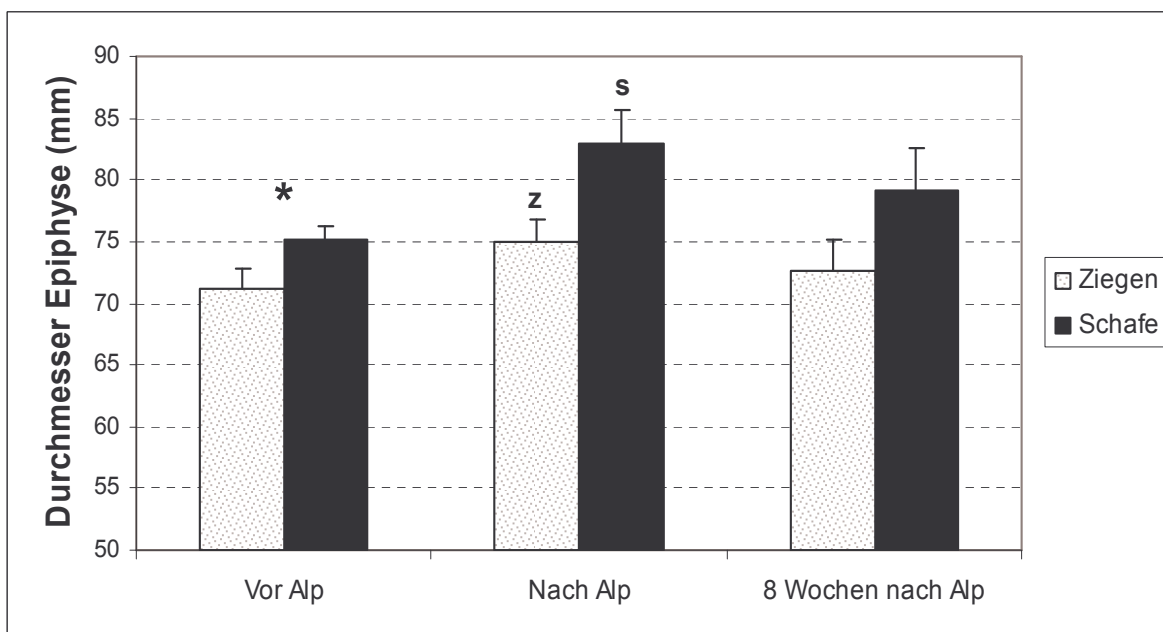
Die Alpfung der Tiere führte bei beiden Spezies zu einem signifikanten Anstieg ( $p = 0.001$ ) des mittleren cortikalen BMC (Abb. 29). Nach Rückkehr von der Alp blieb dieser Wert in etwa gleich. Im trabekulären Knochen (Abb. 30) sank der mittlere BMC während des Alpaufenthaltes bei beiden Tierarten signifikant ab ( $p = 0.024$ ). Während der Wert bei den Schafen auch acht Wochen später noch annähernd gleich dem Wert direkt nach Alpaufahrt war, kam es bei den Ziegen in diesem Zeitraum zu einer tendenziellen Zunahme ( $p = 0.099$ ) des trabekulären BMC.



**Abb. 30:** Trabekuläre Knochenmasse (BMC) gemessen an der Epiphyse; **s**: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe von vor bis nach Alp ( $p = 0.024$ ); **z**: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen von vor bis nach Alp ( $p = 0.001$ )

### 5.4.3. Messung des Knochendurchmessers

#### 5.4.3.1. Messung des Gesamtknochendurchmessers



**Abb. 31:** Gesamtknochendurchmesser an der Epiphyse; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); **s**: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe von vor bis nach Alp ( $p = 0.002$ ); **z**: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen von vor bis nach Alp ( $p = 0.002$ )

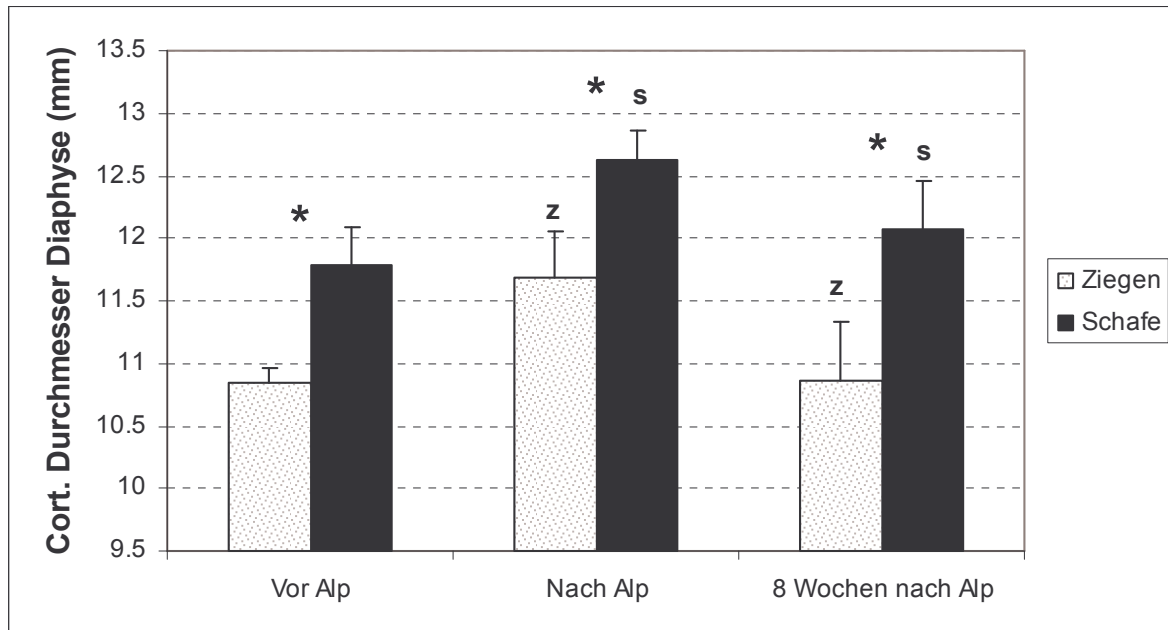
An der Epiphyse (siehe Abb. 31) nahm der Durchmesser im Verlauf der Alpfung bei beiden Tierarten signifikant zu ( $p = 0.002$ ). Ein signifikanter Gruppenunterschied bestand nur bei den Messungen vor der Alp ( $p = 0.024$ ).

**Tab. 5:** Durchmesser der Diaphyse (mm)  $\pm$  STE

	Vor Alp	Nach Alp	8 Wochen nach Alp
<b>Schafe</b>	47.94 $\pm$ 0.43	48.72 $\pm$ 0.59	48.93 $\pm$ 0.54
<b>Ziegen</b>	47.57 $\pm$ 0.60	48.67 $\pm$ 1.04	51.59 $\pm$ 3.14

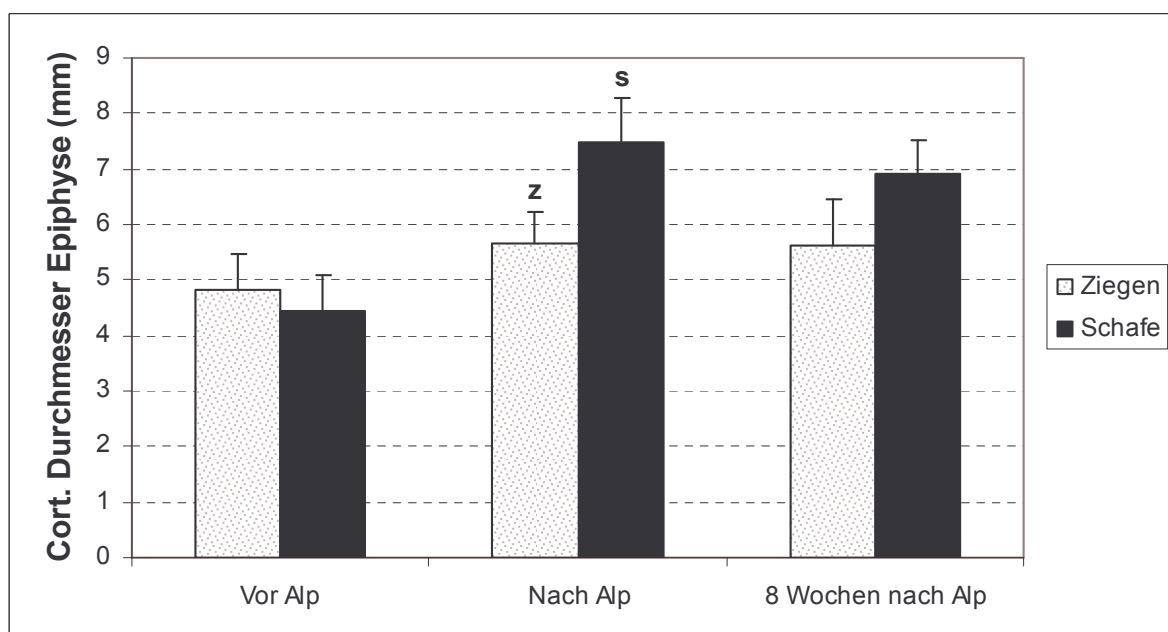
Der Durchmesser der Diaphyse wies dagegen weder im zeitlichen Verlauf noch im Gruppenunterschied signifikante Änderungen auf (siehe Tab. 5).

#### 5.4.3.2. Messung des kortikalen Durchmessers



**Abb. 32:** Cortikaler Durchmesser an der Diaphyse; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe von vor bis nach Alp ( $p = 0.008$ ) und von nach Alp bis 8 Wochen nach Alp ( $p = 0.002$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen von vor bis nach Alp ( $p = 0.008$ ) und von nach Alp bis 8 Wochen nach Alp ( $p = 0.002$ )

Der Durchmesser des Cortex war bei den Schafen an der Diaphyse immer signifikant grösser (Vor Alp:  $p = 0.006$ ; Nach Alp:  $p = 0.020$ ; 8 Wo nach Alp:  $p = 0.001$ ). Bei beiden Tierarten (Abb. 32) kam es an der Diaphyse zu einer signifikanten kortikalen Dickenzunahme von vor bis nach der Alp ( $p = 0.008$ ). Nach Alpfung nahm der Durchmesser der Cortex bei beiden Tierarten wieder signifikant ab ( $p = 0.002$ ).



**Abb. 33:** Cortikaler Durchmesser an der Epiphyse; s, z: Signifikanter zeitlicher Verlauf von vor bis nach Alp ( $p = 0.019$ )

An der Epiphyse kam es zu ähnlichen Umwandlungen (siehe Abb. 33). Hier führte die Alpengang zu einer Zunahme des kortikalen Durchmessers bei beiden Spezies ( $p = 0.019$ ). Nach Rückkehr von der Alp nahm der Durchmesser dann wieder leicht aber nicht signifikant ab.

## 5.5. Blutwerte

### 5.5.1. Mineralstoffe (Calcium, Phosphor, Magnesium)

Die mittlere Calciumkonzentration im Serum war bei allen Messungen bei den Schafen signifikant höher ( $p = 0.001$ ) als bei den Ziegen (Werte siehe Tabelle 6). Von Woche 0 bis 2 erfolgte bei beiden Tierarten ein signifikanter Anstieg ( $p = 0.001$ ) des Calcium im Serum. Bis zur siebten Woche blieb der Serumwert in etwa gleich, um dann von der siebten zur neunten Woche bei beiden Spezies signifikant zu sinken ( $p = 0.001$ ). Nach Alfabfahrt von der 12. bis zur 15. Woche kam es bei beiden Gruppen erneut zu einem signifikanten Anstieg von Calcium im Serum ( $p = 0.001$ ).

**Tab. 6:** Calcium (mmol/l) im Serum  $\pm$  STE

Woche	0	2	5	7	9	12	15
<b>Schafe</b>	2.70 $\pm$ 0.06	2.93 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	2.98 $\pm$ 0.03	3.02 $\pm$ 0.06	2.91 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	3.08 $\pm$ 0.04	3.16 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>
<b>Ziegen</b>	2.54 $\pm$ 0.04	2.76 $\pm$ 0.04 <sup>d</sup>	2.71 $\pm$ 0.06	2.75 $\pm$ 0.04	2.63 $\pm$ 0.03 <sup>e</sup>	2.54 $\pm$ 0.03	2.76 $\pm$ 0.05 <sup>f</sup>
<b>pGruppe*</b>	$p = 0.008$	$p = 0.003$	$p = 0.001$	$p = 0.002$	$p = 0.001$	$p = 0.001$	$p = 0.001$

Signifikanter zeitlicher Verlauf: **a, d:** Wo 0-2  $p = 0.001$ ; **b, e:** Wo 7-9  $p = 0.001$ ; **c, f:** Wo 12-15  $p = 0.001$ ; \* Signifikanter Gruppenunterschied

Bei der ersten Blutentnahme hatten Schafe und Ziegen einen fast identischen Phosphorwert. In den darauffolgenden Blutproben hatten die Schafe stets einen höheren Phosphorspiegel im Serum. Signifikant höher war dieser in Woche 5 ( $p = 0.018$ ), 7 ( $p = 0.002$ ), 9 ( $p = 0.016$ ) und 12 ( $p = 0.001$ ). Während des Alpaufenthaltes von Woche 0 auf 5 sank der Phosphorspiegel bei beiden Spezies signifikant ab ( $p = 0.001$ ). Bis Woche 9 blieb der Wert etwa auf einem Level. Von Woche 9 bis 12 kam es bei den Ziegen zu einem weiteren signifikanten Abfall des Wertes ( $p = 0.038$ ), bei den Schafen dagegen stieg der Wert in dieser Zeit leicht, zu einer signifikanten Steigerung kam es dann bei beiden Tierarten wieder im Tal von Woche 12 auf 15 (Schafe  $p = 0.041$ ; Ziege  $p = 0.002$ ). Die genauen Werte sind in Tabelle 7 dargestellt.

**Tab. 7:** Phosphor (mmol/l) im Serum  $\pm$  STE

Woche	0	2	5	7	9	12	15
<b>Schafe</b>	1.93 $\pm$ 0.10	1.72 $\pm$ 0.10	1.44 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	1.47 $\pm$ 0.06	1.34 $\pm$ 0.07	1.51 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>	1.85 $\pm$ 0.10 <sup>c</sup>
<b>Ziegen</b>	1.92 $\pm$ 0.18	1.52 $\pm$ 0.09	1.18 $\pm$ 0.09 <sup>d</sup>	1.07 $\pm$ 0.08	1.04 $\pm$ 0.10	0.83 $\pm$ 0.06	1.67 $\pm$ 0.10 <sup>e</sup>
<b>p Gruppe*</b>	-	-	$p = 0.018$	$p = 0.002$	$p = 0.016$	$p = 0.001$	-

Signifikanter zeitlicher Verlauf: **a, c:** Wo 0-5  $p = 0.001$ ; **b:** Wo 12-15  $p = 0.041$ ; **d:** Wo 9-12  $p = 0.038$ ; **e:** Wo 12-15  $p = 0.002$ ; \* Signifikanter Gruppenunterschied

Wie schon bei Ca und P waren auch bei Magnesium die Serumwerte der Schafe höher. In Woche 2 bis 12 waren diese Unterschiede signifikant (Werte: siehe Tab. 8). Im zeitlichen Verlauf kam es bei den Ziegen von Woche 0 bis 9 zu einem signifikanten Sinken des Serumwertes ( $p = 0.002$ ). Während des Alpaufenthaltes blieben die Serumwerte der Schafe ungefähr gleich, erst gegen Ende der Alpung von Woche 9 auf 12 fiel der Wert signifikant ( $p = 0.012$ ) ab, um sogleich im Tal von Woche 12 auf 15 wieder signifikant anzusteigen ( $p = 0.021$ ). Auch bei den Ziegen stieg der Wert im Tal wieder signifikant an ( $p = 0.017$ ).

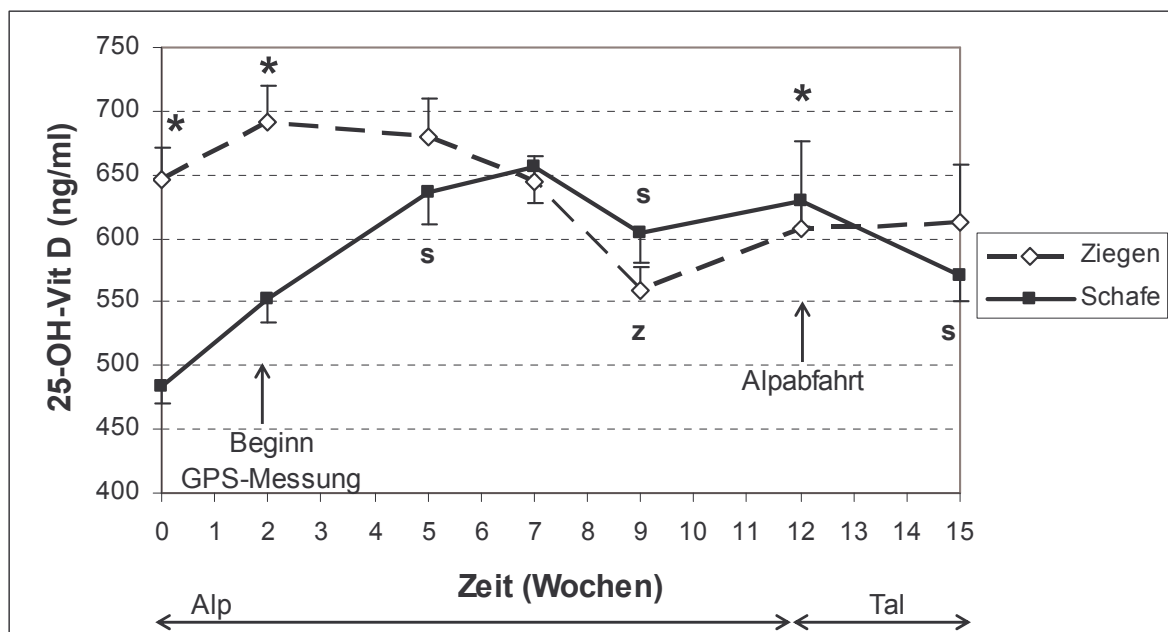
**Tab. 8:** Magnesium (mmol/l) im Serum  $\pm$  STE

Woche	0	2	5	7	9	12	15
Schafe	0.99 $\pm$ 0.02	1.02 $\pm$ 0.02	0.99 $\pm$ 0.01	0.99 $\pm$ 0.02	0.98 $\pm$ 0.03	0.90 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.94 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>
Ziegen	0.94 $\pm$ 0.02	0.91 $\pm$ 0.02	0.88 $\pm$ 0.02	0.84 $\pm$ 0.01	0.82 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	0.82 $\pm$ 0.02	0.88 $\pm$ 0.02 <sup>d</sup>
p Gruppe*	-	$p = 0.001$	$p = 0.001$	$p = 0.001$	$p = 0.001$	$p = 0.004$	-

Signifikanter zeitlicher Verlauf: **a:** Wo 9-12  $p = 0.012$ ; **b:** Wo 12- 15  $p = 0.021$ ; **c:** Wo 0-9  $p = 0.002$ ; **d:** Wo 12-15  $p = 0.017$ ; \* Signifikanter Gruppenunterschied

### 5.5.2. 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D und 25-Hydroxy Vitamin D

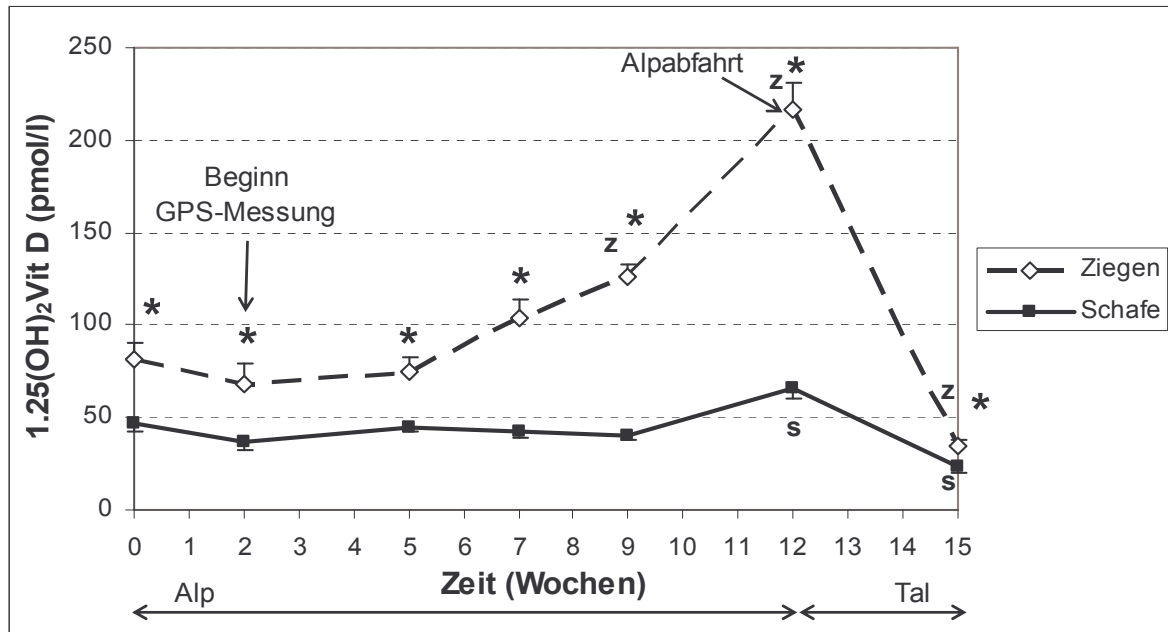
Während in Woche 0 und 2 die Ziegen signifikant höhere 25-OH Vit D Werte hatten ( $p = 0.001$ ), war bei den Schafen in Woche 9 der Wert signifikant höher ( $p = 0.033$ ). Bei den Schafen kam es von Woche 0-5 zu einem signifikanten Anstieg ( $p = 0.001$ ) von 25-OH Vit D im Serum (Abb. 34), von Woche 7 bis 9 fiel der Wert dann wieder signifikant ab ( $p = 0.001$ ) und auch von Woche 12 auf 15 kam es zu einem erneuten signifikanten Abfall des Wertes ( $p = 0.003$ ). Bei den Ziegen war nur von Woche 7 auf 9 ein signifikanter Abfall ( $p = 0.001$ ) zu verzeichnen.



**Abb. 34:** 25-Hydroxy Vitamin D Gehalt im Serum; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); **s:** Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 0-5 ( $p = 0.001$ ); Wo 7-9 ( $p = 0.001$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.003$ ); **z:** Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 7-9 ( $p = 0.001$ )



Im Gruppenvergleich (Abb. 35) hatten die Ziegen stets einen signifikant höheren  $1.25(\text{OH})_2\text{Vitamin D}$  Gehalt im Serum als die Schafe ( $p = 0.001$ ). Die Konzentration von  $1.25 \text{ Vit D}$  stieg bei den Ziegen sowohl von Woche 5 bis 9 ( $p = 0.003$ ) als auch von Woche 9 bis 12 ( $p = 0.001$ ) signifikant an. Nach Alprückkehr (Wo 12-15) kam es dann zu einem signifikanten Abfall des Serumwertes ( $p = 0.002$ ). Bei den Schafen dagegen blieb der  $1.25 \text{ Vit D}$  Level während des Alpaufenthaltes etwa gleich. Es kam erst gegen Ende der Alpung (Wo 9 bis 12) zu einem signifikanten Anstieg ( $p = 0.002$ ). Wie auch bei den Ziegen erfolgte nach Alprückkehr ein signifikanter Abnahme des  $1.25 \text{ Vit D}$  Gehaltes im Serum ( $p = 0.003$ ).

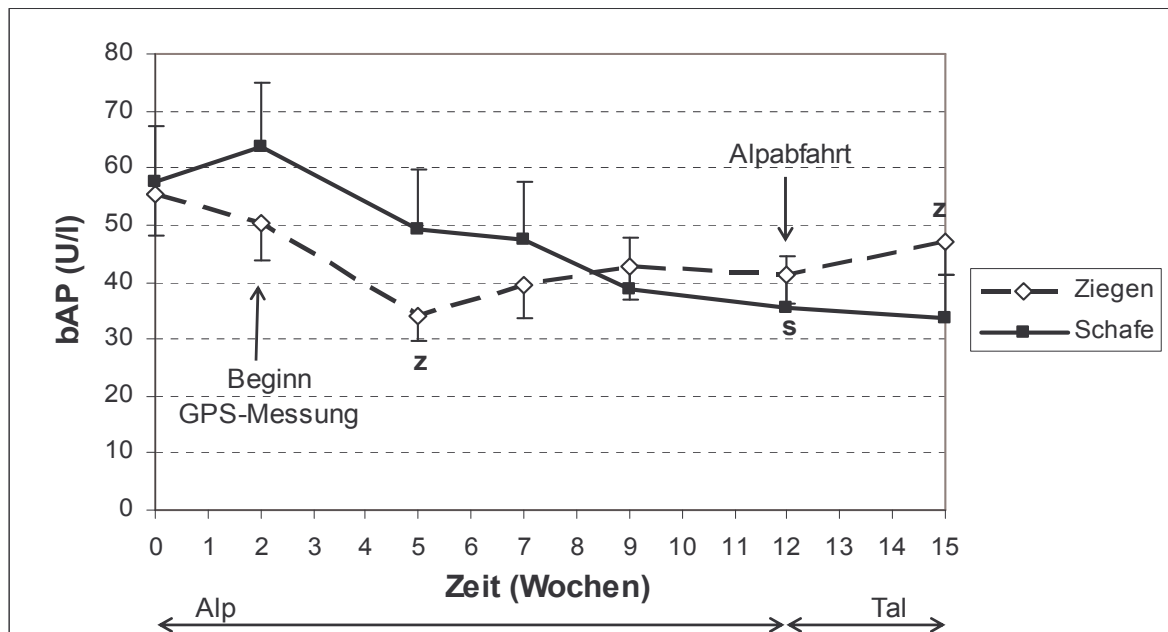


**Abb. 35:**  $1.25(\text{OH})_2\text{Vitamin D}$  Gehalt im Serum; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 9-12 ( $p = 0.002$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.003$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 5-9 ( $p = 0.003$ ); Wo 9-12 ( $p = 0.001$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.002$ )

### 5.5.3. Knochenmarker

#### 5.5.3.1. Knochenspezifische Alkalische Phosphatase (Knochenformation)

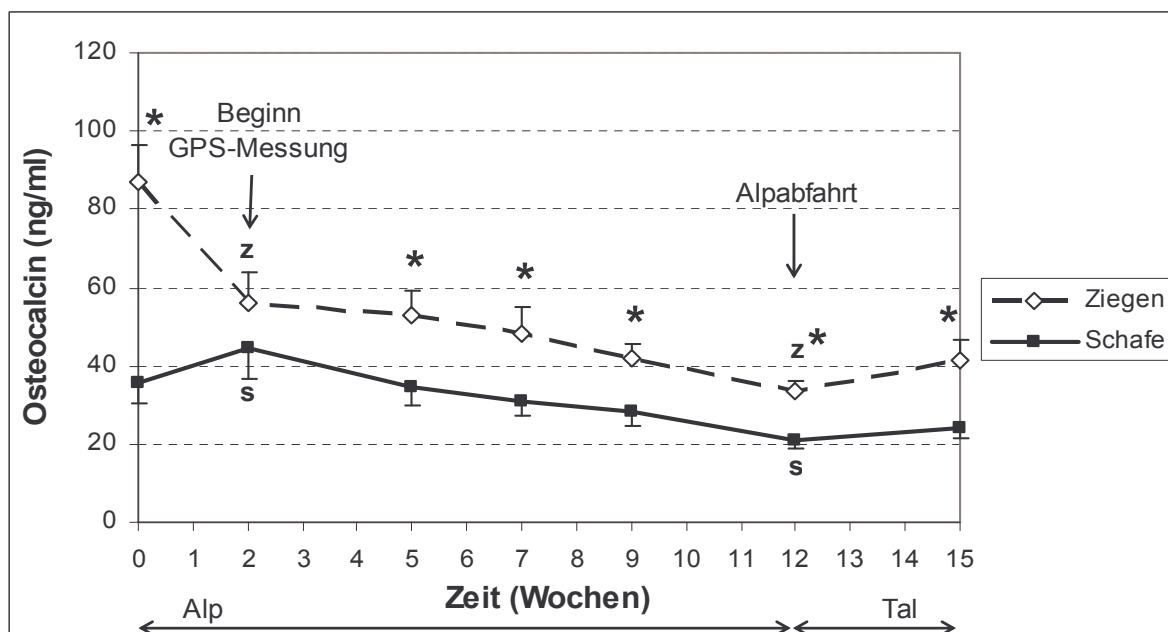
Die mittlere bAP-Aktivität nahm bei den Schafen von der zweiten Woche der Alpung bis Alfabfahrt (Wo 2-12) signifikant ab ( $p = 0.001$ ). Bei den Ziegen erfolgte von Woche 2 bis 5 ebenfalls eine signifikante Abnahme der bAP-Aktivität ( $p = 0.001$ ). Von diesem Zeitpunkt bis Woche 15 kam es dann erneut zu einer signifikanten Zunahme der bAP-Aktivität ( $p = 0.010$ ) bei den Ziegen (Abb. 36). Ein signifikanter Gruppenunterschied zwischen den beiden Spezies existierte zu keinem Zeitpunkt der Messungen.



**Abb. 36:** Knochenspezifische Alkalische Phosphatase (bAP) im Serum; **s**: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 2-12 ( $p = 0.001$ ); **z**: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 2-5 ( $p = 0.001$ ); Wo 5-15 ( $p = 0.010$ )

### 5.5.3.2. Osteocalcin (Knochenformation)

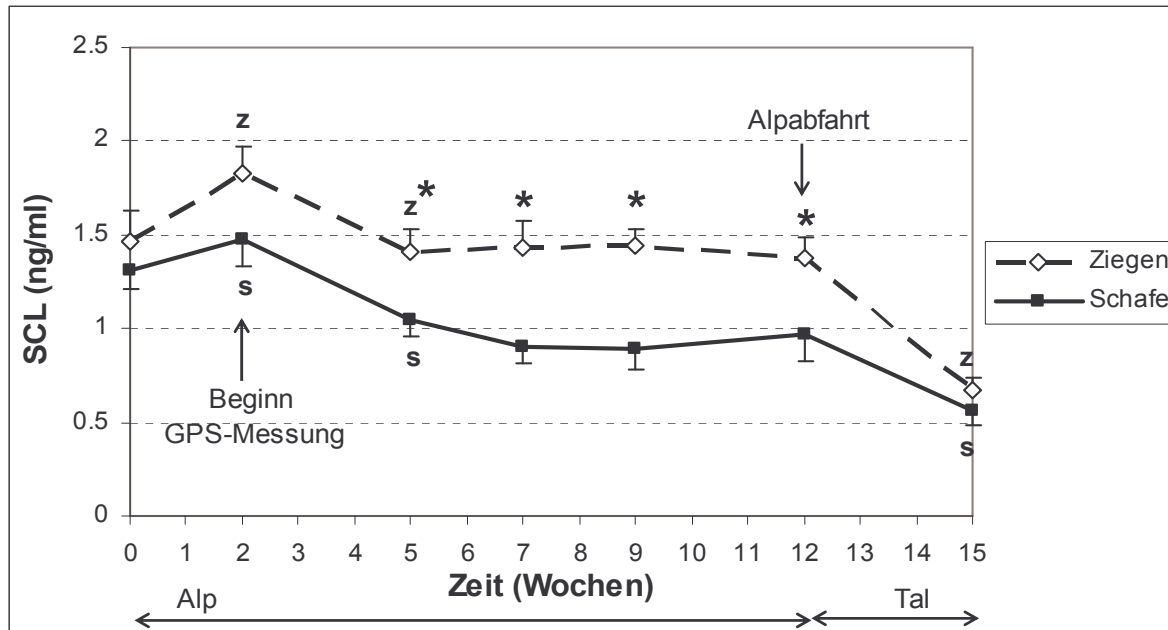
Die Ziegen hatten bis auf die Messung in der zweiten Woche über den gesamten Zeitraum eine signifikant höhere OC-Konzentration im Serum als die Schafe ( $p = 0.016$ ). Ab Woche 2 verhielten sich die OC-Werte ähnlich (Abb. 37). Bei beiden Tierarten kam es zu einem signifikanten Abfall von Woche 2 bis 12 ( $p = 0.001$ ). Von Woche 0 bis 2 verlief die Konzentration allerdings gegensätzlich; bei den Schafen kam es in diesem Zeitraum zu einem signifikanten Zunahme ( $p = 0.027$ ), während die OC-Konzentration bei den Ziegen signifikant sank ( $p = 0.001$ ).



**Abb. 37:** Osteocalcin (OC) im Serum; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); **s**: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 0-2 ( $p = 0.027$ ); Wo 2-12 ( $p = 0.001$ ); **z**: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 0-2 ( $p = 0.001$ ); Wo 2-12 ( $p = 0.001$ )

### 5.5.3.3. Serum-Crosslaps (Knochenresorption)

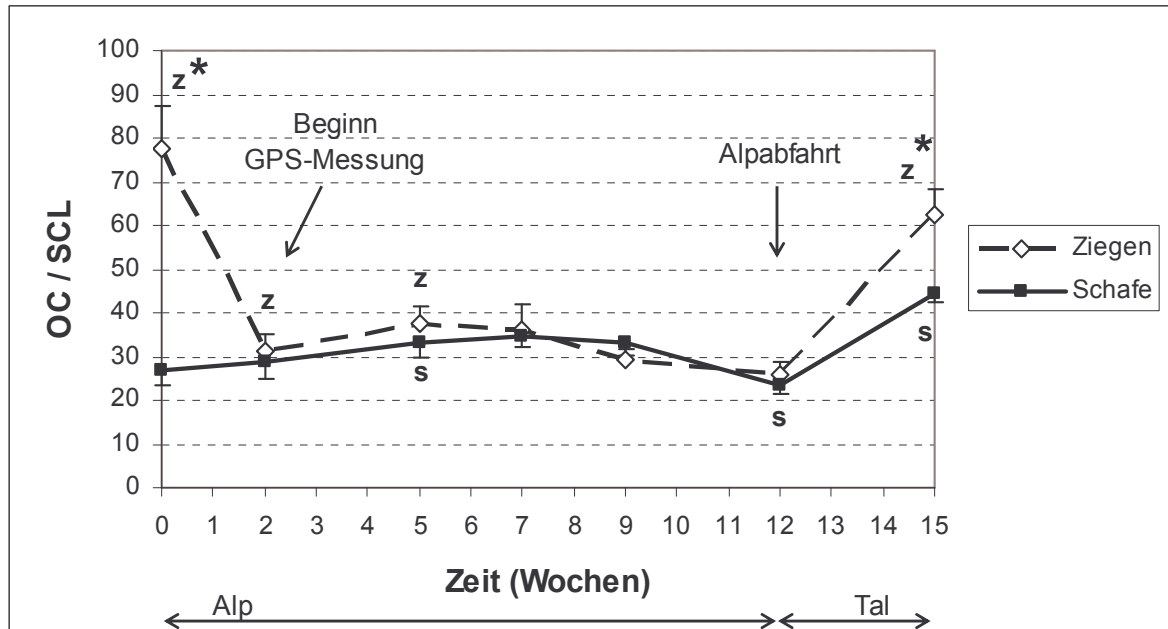
Die Verlaufskurve der SCL-Konzentration im Serum war bei Schafen und Ziegen ähnlich (Abb. 38). Nach einem signifikanten Anstieg ( $p = 0.013$ ) in den ersten zwei Wochen auf der Alp kam es dann bis zur fünften Woche zu einem signifikanten Absinken der Aktivität ( $p = 0.001$ ) bei beiden Tierarten. In den darauffolgenden Wochen bis zur Alpabfahrt blieb der Wert etwa konstant. Im Tal (Wo 12-15) kam es dann zu einer erneuten signifikanten Abnahme der SCL-Konzentration ( $p = 0.001$ ). Wie auch schon beim Osteocalcin hatten die Ziegen höhere SCL-Werte als die Schafe. Ein signifikanter Gruppenunterschied bestand allerdings nur in der Woche 5 ( $p = 0.029$ ), 7, 9 (je  $p = 0.003$ ) und 12 ( $p = 0.014$ ).



**Abb. 38:** Serum-Crosslaps (SCL) im Serum; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 0-2 ( $p = 0.013$ ); Wo 2-5 ( $p = 0.001$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.001$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 0-2 ( $p = 0.013$ ); Wo 2-5 ( $p = 0.001$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.001$ )

### 5.5.3.4. Knochenindex

Um den Index der Knochenmarker zu berechnen, wurden die jeweiligen OC-Werte (Aufbaumarker) durch die SCL-Werte (Abbaumarker) dividiert (Abb. 39). Demnach kann bei einem Sinken der Verlaufskurve entweder von einem reduzierten Knochenaufbau oder einem gesteigertem Abbau ausgegangen werden, umgekehrtes gilt für den Anstieg der Kurve. Solange die Kurve auf einer Ebene bleibt, besteht ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Knochenauf- und -abbau.



**Abb. 39:** Index aus den Knochenmarkern Osteocalcin (OC) und Serum-Crosslaps (SCL) (OC/SCL); \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 2-5 ( $p = 0.005$ ); Wo 7-12 ( $p = 0.001$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.001$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 0-2 ( $p = 0.003$ ); Wo 2-5 ( $p = 0.005$ ); Wo 7-12 ( $p = 0.001$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.001$ )

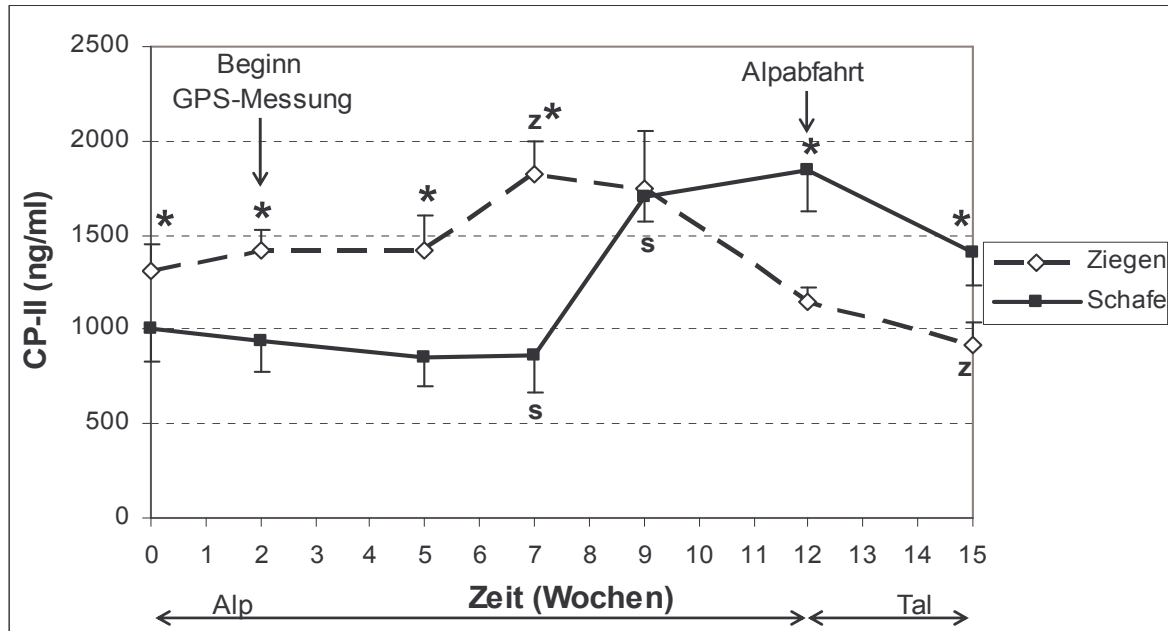
Sowohl bei der ersten wie auch der letzten Blutentnahme kam es zu einem signifikanten Gruppenunterschied (Wo 0  $p = 0.001$ ; Wo 15  $p = 0.036$ ) zwischen Schaf und Ziege, wobei die Ziegen hier, wie auch bei den Einzelwerten, die höheren Werte aufwiesen.

Innerhalb der ersten zwei Alpwochen kam es zu einem signifikanten Abfall des OC/SCL-Index bei den Ziegen ( $p = 0.003$ ). Daraufhin erfolgte bei beiden Spezies bis Woche 5 ein signifikanter Anstieg des Knochenindex ( $p = 0.005$ ). Von Woche 7 auf 12 kam es dann wieder zu einem signifikanten Abfall ( $p = 0.001$ ) der Index-Werte. Nach Alpabfahrt stieg der Knochenindex erneut signifikant an ( $p = 0.001$ ).

## 5.5.4. Knorpelmarker

### 5.5.4.1. CP-II (Knorpelformation)

Während es bei den Ziegen zu einem signifikanten Anstieg ( $p = 0.003$ ) der CP-II-Werte von Woche 0 bis 7 kam, verzeichneten die Schafe in diesem Zeitraum einen signifikanten ( $p = 0.036$ ) Abfall der CP-II-Werte. Eine signifikante Zunahme erfolgte bei den Schafen erst in den Alpwochen 7 bis 9 ( $p = 0.001$ ). Bis Ende der Alpung stieg die CP-II-Konzentration bei den Schafen weiter an, während es bei den Ziegen schon wieder zu einer Abnahme der Aktivität kam (Ziegen Wo 9-15  $p = 0.002$ ). Auch bei den Schafen zeigten die Werte eine Tendenz zur Abnahme, allerdings erfolgte diese nicht wie bei den Ziegen gegen Ende der Alpzeit, sondern erst als sich die Schafe bereits wieder im Tal befanden (Abb. 40).



**Abb. 40:** Knorpelformationsmarker CP-II im Serum; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 0-7 ( $p = 0.036$ ); Wo 7-9 ( $p = 0.001$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 0-7 ( $p = 0.003$ ); Wo 9-15 ( $p = 0.002$ )

Die Ziegengruppe startete mit signifikant höheren Werten als die Schafe ( $p = 0.017$ ). Dieser signifikante Gruppenunterschied blieb bis zur siebten Woche bestehen (Wo 2  $p = 0.001$ ; Wo 5  $p = 0.004$ , Wo 7  $p = 0.001$ ). Wegen der frühen Abnahme der CP-II-Werte bei den Ziegen überschritten sich die Werte in Woche 9, danach kam es dann wieder zu einem signifikanten Gruppenunterschied (Wo 12  $p = 0.002$ ; Wo 15  $p = 0.012$ ), wobei sich nun die höheren CP-II-Konzentrationen bei den Schafen fanden.

#### 5.5.4.2. CTX-II (Knorpelresorption)

Bei der Messung der Aktivität des Knorpelresorptionsmarker CTX-II kam es zu sehr hohen Standardabweichungen und daraus resultierenden hohen Standardfehlern (Werte in Tab. 9). Es gab keinen signifikanten Gruppenunterschied zwischen Schaf und Ziege.

**Tab. 9:** Enzymaktivität des Knorpelresorptionsmarker CTX-II (pg/ml) im Serum  $\pm$  STE

Woche	0	2	5	7	9	12	15
<b>Schafe</b>	46.19 $\pm 20.96$	53.49 $\pm 16.56^a$	43.56 $\pm 12.77$	44.80 $\pm 12.40$	39.22 $\pm 13.04$	53.52 $\pm 15.60$	38.67 $\pm 13.59^b$
<b>Ziegen</b>	54.80 $\pm 33.63$	54.67 $\pm 30.75$	54.62 $\pm 33.54$	52.98 $\pm 33.09$	47.35 $\pm 27.26$	44.67 $\pm 27.01^c$	53.54 $\pm 35.05$

Signifikanter zeitlicher Verlauf: a: Wo 0-2  $p = 0.012$ ; b: Wo 12-15  $p = 0.010$ ; c: Wo 9-12  $p = 0.011$

Die Aktivität von CTX-II war bei den Ziegen relativ konstant über die Alpsaison. Nur gegen Ende, von Woche 9 auf 12, lies sich ein signifikanter Abfall ( $p = 0.011$ ) der Enzymaktivität feststellen. Bei den Schafen dagegen stieg diese in den ersten zwei Wochen signifikant an ( $p = 0.012$ ). Danach kam es von Woche 2 auf 5 zu einem tendenziellen ( $p = 0.053$ ) Absinken der CTX-II-Konzentration bei den Schafen. Anschliessend blieb die Aktivität für den weiteren Alpaufenthalt bei beiden Spezies relativ gleich. Nach Alpabfahrt ergab sich

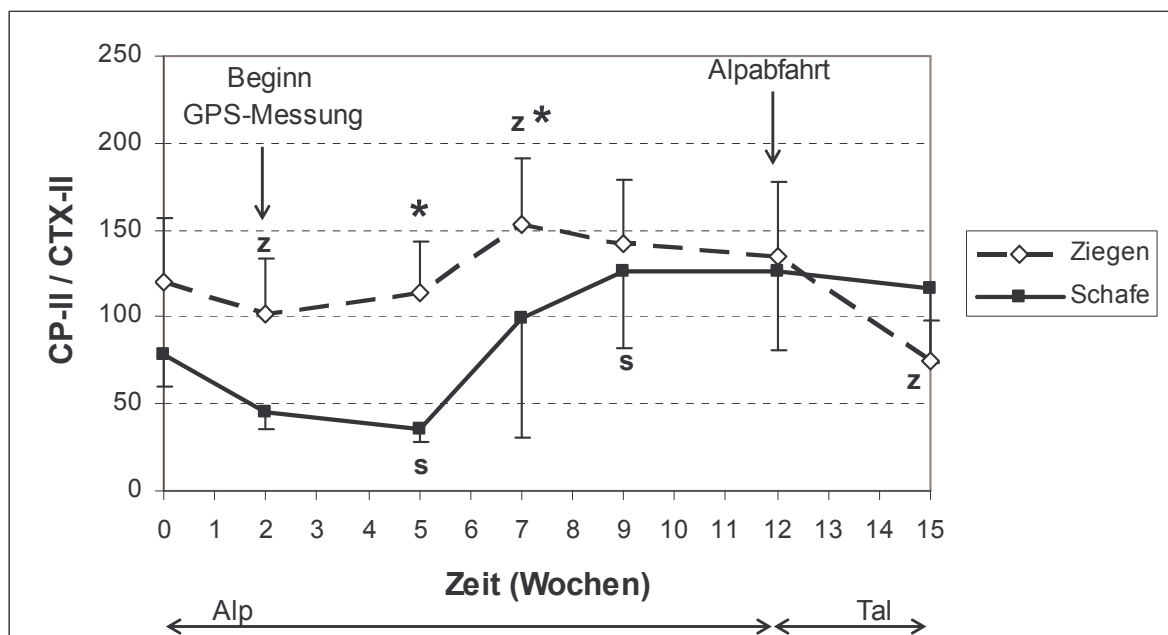


von Woche 12 bis 15 bei den Schafen ein signifikanter Abfall der CTX-II-Werte ( $p = 0.010$ ).

#### 5.5.4.3. Knorpelindex

Das Prinzip des Knorpelindex entspricht dem des Knochenindex (siehe 5.4.3.4.). Es wurden die Werte der Knorpelaufbaumarker CP-II durch die des Abbaumarkers CTX-II dividiert (Abb. 41).

Beim Knorpelindex kam es zu einem signifikanten Gruppenunterschied zwischen den zwei Tierarten in Woche 5 ( $p = 0.012$ ) und 7 ( $p = 0.011$ ). Von Woche 0 bis 2 nahm der Knorpelindex bei den Ziegen signifikant ( $p = 0.036$ ) ab, bei den Schafen verlief diese Abnahme des Index bis zur fünften Woche mit einer Signifikanz von  $p = 0.008$ . Bei beiden Tieren stieg der Index nun signifikant an. Bei den Ziegen ergab sich von Woche 5 bis 7 ein Anstieg mit einer Signifikanz von  $p = 0.020$ , bei den Schafen verlief der Anstieg länger (Wo 5-9) und signifikant stärker ( $p = 0.001$ ) aus. Während der Wert nun bei den Schafen relativ konstant blieb, kam es bei den Ziegen nach Rückkehr von der Alp (Wo 12-15  $p = 0.008$ ) zu einem signifikanten Abfall des Knorpelindex.



**Abb. 41:** Index aus den Knorpelmarkern CP-II und CTX-II (CP-II/CTX-II); \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 0-5 ( $p = 0.008$ ); Wo 5-9 ( $p = 0.001$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 0-2 ( $p = 0.036$ ); Wo 5-7 ( $p = 0.020$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.008$ )

#### 5.5.5. Parameter des Energiestoffwechsels im Blut

##### 5.5.5.1. Glucose

Bei Messung der Glucose-Werte kam es zu signifikanten Schwankungen bei den Ziegen (siehe Tabelle 10). Von Woche 0 auf 2 ( $p = 0.002$ ) stieg der Wert, anschliessend sank der Wert von Woche 2 auf 5 ( $p = 0.002$ ), und stieg dann bis Woche 9 wieder signifikant an ( $p = 0.001$ ). Auch von Woche 9 bis 12 zeigte sich ein weiterer signifikanter Anstieg ( $p = 0.001$ ).

Nach Rückkehr von der Alp kam es dann von Woche 12 auf 15 erneut zu einem signifikanten Absinken der Glucose ( $p = 0.002$ ).

Die Glucose-Werte der Schafe blieben im Gegensatz zu den Werten der Ziegen stabiler, dennoch sank von Woche 0 auf 2 der Blutzuckerspiegel signifikant ab ( $p = 0.005$ ). Von Woche 5 auf 7 stieg der Blutzuckerwert wieder signifikant an ( $p = 0.001$ ). Auch von Woche 9 auf 12 liess sich ein weiterer signifikanter Anstieg verzeichnen ( $p = 0.015$ ).

Zu Gruppenunterschieden zwischen den beiden Spezies kam es in Woche 2, 5, 9, 12 und 15 (Signifikanzen siehe Tab. 10).

**Tab. 10:** Glucose (mmol/l) im Serum  $\pm$  STE

Woche	0	2	5	7	9	12	15
<b>Schafe</b>	3.29 $\pm$ 0.07	3.02 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	2.91 $\pm$ 0.06	3.21 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	3.23 $\pm$ 0.07	3.51 $\pm$ 0.10 <sup>c</sup>	3.28 $\pm$ 0.06
<b>Ziegen</b>	3.11 $\pm$ 0.05	3.50 $\pm$ 0.08 <sup>d</sup>	3.20 $\pm$ 0.09 <sup>e</sup>	3.26 $\pm$ 0.05	3.50 $\pm$ 0.09 <sup>f</sup>	8.57 $\pm$ 0.47 <sup>g</sup>	3.42 $\pm$ 0.09 <sup>h</sup>
<b>p Gruppe*</b>	-	$p = 0.001$	$p = 0.010$	-	$p = 0.014$	$p = 0.001$	$p = 0.026$

Signifikanter zeitlicher Verlauf: **a:** Wo 0-2  $p = 0.005$ ; **b:** Wo 5-7  $p = 0.001$ ; **c:** Wo 9-12  $p = 0.015$ ; **d:** Wo 0-2  $p = 0.002$ ; **e:** Wo 2-5  $p = 0.002$ ; **f:** Wo 5-9  $p = 0.001$ ; **g:** Wo 9-12  $p = 0.001$ ; **h:** Wo 12-15  $p = 0.002$ ; \* Signifikanter Gruppenunterschied

### 5.5.5.2. Lactat

Die Schafe hatten bis auf die Probenentnahme in Woche 12 stets signifikant höhere Lactat-Werte als die Ziegen (Signifikanzen und Werte siehe Tab. 11). Der Lactat-Wert fiel zu Beginn der Alpung bei den Schafen leicht ab, blieb dann aber mehr oder weniger konstant, auch nach der Alpung änderte sich der Wert nicht signifikant.

**Tab. 11:** Lactat (mmol/l) im Serum  $\pm$  STE

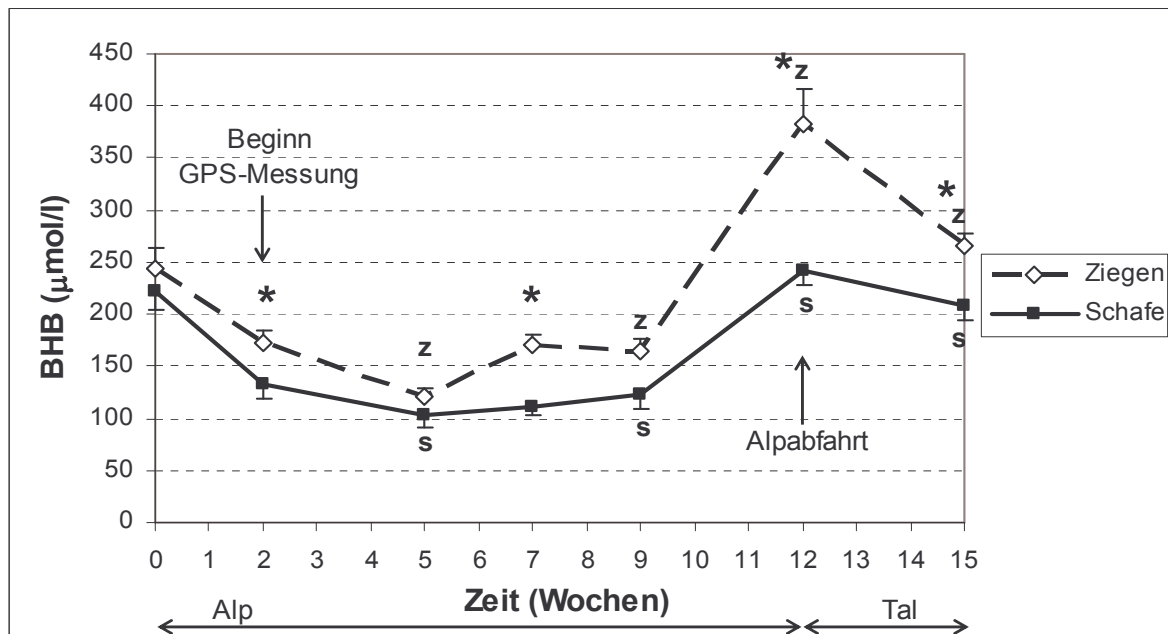
Woche	0	2	5	7	9	12	15
<b>Schafe</b>	2.73 $\pm$ 1.06	0.93 $\pm$ 0.10	0.92 $\pm$ 0.13	0.89 $\pm$ 0.23	0.90 $\pm$ 0.12	0.64 $\pm$ 0.10	0.88 $\pm$ 0.22
<b>Ziegen</b>	0.35 $\pm$ 0.02	0.41 $\pm$ 0.04	0.40 $\pm$ 0.04	0.47 $\pm$ 0.07	0.49 $\pm$ 0.07	0.80 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.38 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>
<b>p Gruppe*</b>	$p = 0.001$	$p = 0.001$	$p = 0.001$	$p = 0.005$	$p = 0.016$	-	$p = 0.003$

Signifikanter zeitlicher Verlauf: **a:** Wo 9-12  $p = 0.041$ ; **b:** Wo 12-15  $p = 0.002$ ; \* Signifikanter Gruppenunterschied

Auch die Ziegen hatten einen relativ konstanten Wert, der von Woche 9 bis 12 signifikant anstieg ( $p = 0.041$ ). Im Tal (Wo 12-15) fiel der Wert dann wieder signifikant ab ( $p = 0.002$ ).

### 5.5.5.3. $\beta$ -Hydroxybutyrat

Die Serumwerte von BHB verliefen bei beiden Spezies ähnlich, wenngleich Änderungen bei den Ziegen deutlich ausgeprägter waren (Abb. 42). Der BHB-Wert sank bei beiden Gruppen in den ersten fünf Wochen signifikant ab ( $p = 0.001$ ). Anschliessend kam es bis Woche 9 zu einem Anstieg des BHB-Wertes ( $p = 0.004$ ). Nach diesem ersten Anstieg erfolgte ein weiterer sprunghafter Anstieg von Woche 9 auf 12 ( $p = 0.001$ ). Nachdem die Tiere die Alp verlassen hatten, kam es zu einer signifikanten Senkung von BHB im Serum ( $p = 0.003$ ).



**Abb. 42:**  $\beta$ -Hydroxybutyrat (BHB) im Serum; \*: Signifikanter Gruppenunterschied ( $p \leq 0.05$ ); s: Signifikanter zeitlicher Verlauf Schafe: Woche (Wo) 0-5 ( $p = 0.001$ ); Wo 5-9 ( $p = 0.004$ ); Wo 9-12 ( $p = 0.001$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.003$ ); z: Signifikanter zeitlicher Verlauf Ziegen: Wo 0-5 ( $p = 0.001$ ); Wo 5-9 ( $p = 0.004$ ); Wo 9-12 ( $p = 0.001$ ); Wo 12-15 ( $p = 0.003$ )

#### 5.5.5.4. Urea

Die Harnstoff-Werte lagen bei allen Messungen im Referenzbereich der jeweiligen Tierart (siehe Tab. 12). Während der Wert bei den Schafen bis auf einen signifikanten Abfall von Woche 5 auf 7 ( $p = 0.005$ ) in etwa gleich blieb, war der Wert bei den Ziegen weit weniger konstant. So kam es bei den Ziegen am Anfang des Alpaufenthaltes (Wo 0-2) zu einem signifikanten Abfall des Serum-Urea-Wertes ( $p = 0.006$ ). Anschliessend kam es bis Woche 5 zu einem signifikanten Anstieg ( $p = 0.005$ ). Danach sank der Wert bis Alpabfahrt wieder signifikant ab (Wo 5-9  $p = 0.001$ ; Wo 9-12  $p = 0.001$ ). Im Tal kam es dann bis zur letzten Messung in Woche 15 wieder zu einem signifikanten Anstieg des Harnstoffes im Serum ( $p = 0.002$ ).

**Tab. 12:** Harnstoff (mmol/l) im Serum  $\pm$  STE

Woche	0	2	5	7	9	12	15
Schafe	6.19 $\pm$ 0.23	6.90 $\pm$ 0.31	6.79 $\pm$ 0.24	6.32 $\pm$ 0.23 <sup>a</sup>	6.35 $\pm$ 0.17	6.53 $\pm$ 0.23	6.72 $\pm$ 0.20
Ziegen	7.22 $\pm$ 0.31	6.03 $\pm$ 0.34 <sup>b</sup>	7.00 $\pm$ 0.25 <sup>c</sup>	6.62 $\pm$ 0.27	5.86 $\pm$ 0.23 <sup>d</sup>	3.31 $\pm$ 0.20 <sup>e</sup>	7.06 $\pm$ 0.27 <sup>f</sup>
p Gruppe*	p = 0.004	-	-	-	-	p = 0.001	-

Signifikanter zeitlicher Verlauf: a: Wo 5-7  $p = 0.005$ ; b: Wo 0-2  $p = 0.006$ ; c: Wo 2-5  $p = 0.005$ ; d: Wo 5-9  $p = 0.001$ ; e: Wo 9-12  $p = 0.001$ ; f: Wo 12-15  $p = 0.002$ ; \* Signifikanter Gruppenunterschied

## 5.6. Kotanalyse

Insgesamt wurden über fünf Wochen (Wo 7-11) zwei Sammelkotproben pro Woche und Tierart entnommen. Für die Auswertung wurde der Mittelwert der zwei Proben von einer Woche und einer Tierart gebildet, so ergaben sich pro Spezies fünf Werte (Wo 7, 8, 9, 10, 11).

**Tab. 13:** Rohnnährstoffgehalt der Kotproben

Woche	oS (%)	TS (%)	Rp (%)	Ra (%)	N (%)	NDF (%)	ADF (%)	ADL (%)	BE (J/g)
<b>Schafe</b>									
7	77.57	30.12	16.71	22.43	2.67	45.11	34.76	19.47	18129.08
8	76.56	27.47	16.74	23.44	2.68	42.17	33.54	17.46	17404.21
9	74.29	28.61	16.74	25.72	2.68	40.42	33.08	18.51	17231.29
10	75.81	27.69	16.88	24.19	2.70	41.32	31.46	17.23	17331.66
11	75.20	29.37	16.21	24.80	2.59	42.49	32.60	17.33	17558.05
<b>Ziegen</b>									
7	89.20	40.19	12.59	10.80	2.01	64.88	53.07	30.30	20758.25
8	88.07	37.76	13.36	11.92	2.14	62.51	47.71	26.28	20757.06
9	87.50	38.95	13.33	12.50	2.13	62.36	48.52	27.53	21133.78
10	88.36	37.03	13.01	11.64	2.08	63.42	52.18	30.43	21117.08
11	91.29	43.64	12.16	8.71	1.95	69.24	56.88	34.33	21265.47
<b>pGruppe*</b>	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

\* Signifikanter Gruppenunterschied

Der Kot von Schaf und Ziege unterschied sich in allen untersuchten Parametern (ausser bei der Mineralienanalyse der Rohasche) signifikant voneinander, während es im zeitlichen Verlauf bei den einzelnen Tierarten zu keinerlei signifikanten Änderungen kam (Tab. 13). Der Schafskot hatte einen signifikant höheren Gehalt an Ra ( $p = 0.001$ ), Rp und Stickstoff (N) (je  $p = 0.001$ ). Alle anderen Werte (oS, TS, NDF, ADF, ADL, BE) waren dagegen während der gesamten Alpzeit im Ziegenkot signifikant höher ( $p = 0.001$ ; ausser TS:  $p = 0.003$ ).

**Tab. 14:** Mineralstoffgehalt (% der TS) in der Rohasche der Kotproben

Woche		7	8	9	10	11
<b>Ca %</b>	Schaf	0.669	0.679	0.412	0.973	0.616
	Ziege	0.445	0.386	0.483	0.456	0.326
<b>P %*</b>	Schaf	0.055	0.050	0.065	0.046	0.049
	Ziege	0.029	0.036	0.032	0.033	0.029
<b>Mg %</b>	Schaf	0.132	0.107	0.191	0.140	0.123
	Ziege	0.066	0.073	0.065	0.081	0.059

\* Signifikanter Gruppenunterschied:  $p = 0.049$

Die Analyse der Mineralien aus der Rohasche der Kotproben zeigte im zeitlichen Verlauf keine signifikanten Veränderungen (Tab. 14). Auch gab es keinen signifikanten Unterschied im Ca- und Mg-Gehalt des Kotes zwischen Schaf und Ziege. Wie auch bei der Rohaschenanalyse der Futterproben (Tab. 16), liess sich lediglich beim P-Gehalt ein signifikanter Unterschied ( $p = 0.049$ ) zwischen den beiden Tiergruppen feststellen. Hierbei hatten die Schafe stets den höheren P-Gehalt im Kot.

## 5.7. Futterpflanzenanalyse

Von der zweiten bis zur elften Woche des Alpaufenthaltes wurden Futterpflanzen gesammelt. Die nachfolgende Karte (Abb. 43) zeigt die Lokalisationen dieser Pflanzenprobenentnahmen (Wo 2-11).



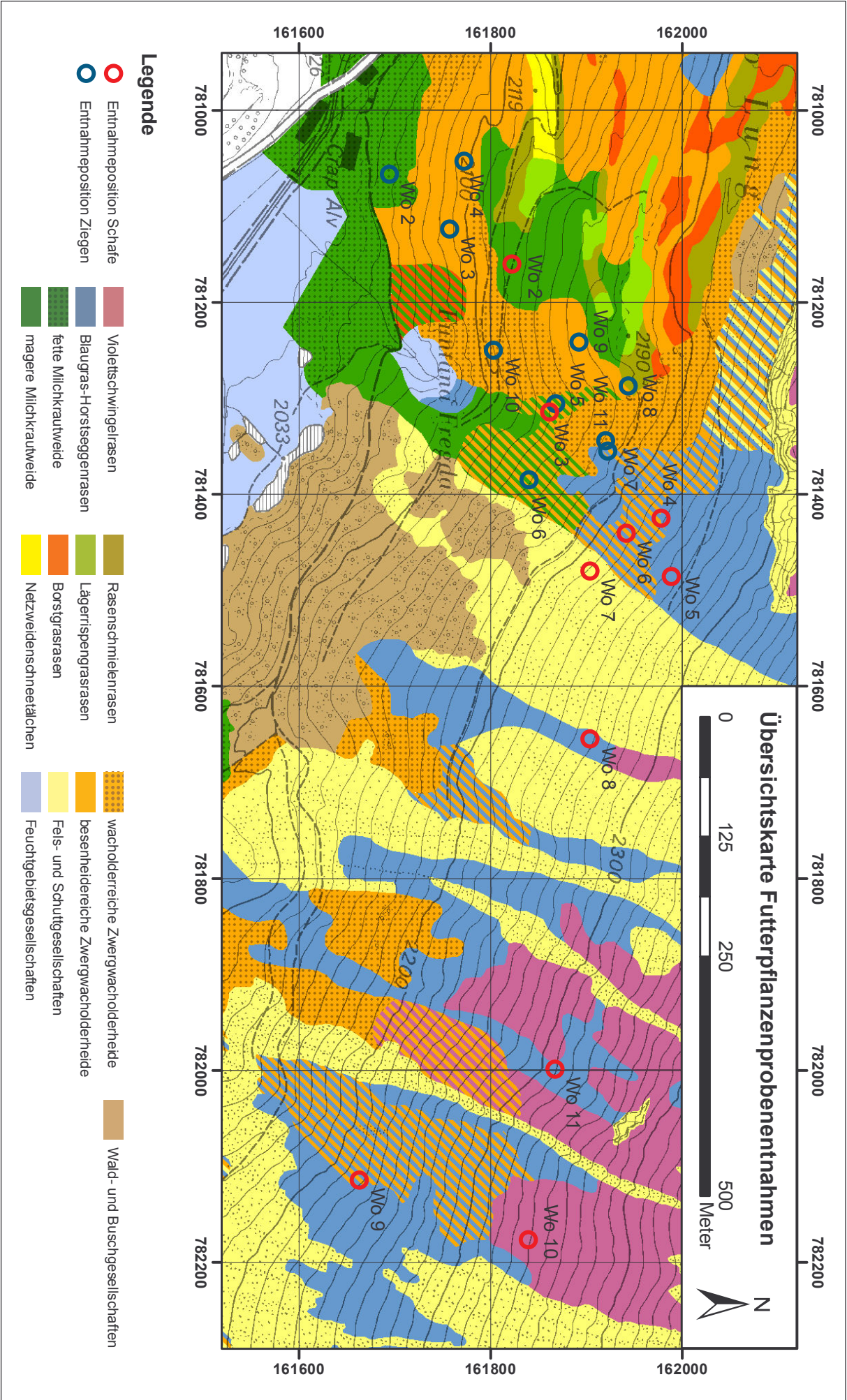


Abb. 43: Entnahmestellen der Pflanzenproben Woche (Wo) 2-11 in einer botanischer Karte der Alp Weissenstein nach Keller (2006) und Schmid (2007)



Da nur eine Futterprobe pro Tierart und Woche gesammelt wurde, wurde nur der Gruppenunterschied zwischen Schaf und Ziege statistisch berechnet. Eine statistische Auswertung bezüglich des zeitlichen Verlaufes wurde nicht gemacht und auch nicht als sinnvoll erachtet, da die Probenentnahme nicht standardisiert werden konnte. So erfolgten die Entnahmen zu verschiedenen Tageszeiten, ohne Rücksicht darauf, wie weit die Tiere bereits gewandert waren. Die Einzelwerte der Probenentnahmen sind in den Tabelle 15 und 16 zu finden.

**Tab. 15:** Rohrnährstoffgehalt der gesammelten Futterpflanzen

Woche	oS (%)	TS (%)	Rp (%)	Ra (%)	N (%)	NDF (%)	ADF (%)	ADL (%)	BE (J/g)
<b>Schafe</b>									
2	95.38	31.87	12.95	4.62	2.07	64.10	34.68	6.53	19359.08
3	92.81	27.23	13.20	7.20	2.11	47.10	30.05	7.86	18806.78
4	92.14	28.34	12.47	7.86	1.99	48.34	27.24	5.40	18501.50
5	92.93	27.31	11.72	7.06	1.88	51.91	31.15	7.25	18863.56
6	92.66	30.65	13.01	7.34	2.08	44.34	25.82	7.30	20522.87
7	91.98	24.84	13.92	8.01	2.23	47.21	32.75	7.39	18545.85
8	92.89	27.81	12.55	7.11	2.01	57.95	27.06	8.32	18422.12
9	91.92	25.78	12.23	8.08	1.96	39.19	31.69	9.07	18523.85
10	92.55	25.98	11.94	7.45	1.91	46.95	30.91	8.06	18414.42
11	91.70	29.53	10.62	8.30	1.70	44.79	29.32	7.66	18244.91
<b>Ziegen</b>									
2	93.41	23.86	11.03	6.59	1.76	55.43	42.64	17.95	19902.62
3	91.16	20.00	9.74	8.83	1.56	39.80	29.79	8.71	18614.79
4	93.14	31.48	10.38	6.86	1.66	47.88	36.28	15.33	19466.57
5	95.21	35.86	8.05	4.79	1.29	60.65	50.55	28.69	21108.79
6	96.00	37.23	9.63	4.00	1.54	55.21	44.22	28.57	20969.36
7	94.58	31.50	11.11	5.42	1.78	54.49	40.96	18.72	19970.34
8	94.54	26.65	10.77	5.48	1.72	57.55	38.52	20.82	20099.32
9	95.67	39.93	9.22	4.33	1.47	51.94	40.24	20.19	20303.92
10	95.62	38.54	9.35	4.38	1.50	54.97	43.44	22.20	20650.50
11	95.49	38.49	8.59	4.51	1.37	62.37	53.00	31.88	21414.69
<b>p Gruppe*</b>	0.006	-	0.001	0.006	0.001	-	0.001	0.001	0.001

\* Signifikanter Gruppenunterschied

Bei der Analyse der Futterpflanzen ergaben sich nur bei der TS und den NDF keine signifikanten Unterschiede zwischen der Schaf- und Ziegengruppe, alle anderen analysierten Parameter wiesen signifikante Gruppenabweichungen auf.

Das Futter der Schafe enthielt durchgängig mehr Rp als das Futter der Ziegen ( $p = 0.001$ ). Nach der dritten Woche auf der Alp war auch der Gehalt an Ra ( $p = 0.006$ ) bei den Schafen stets höher als beim Ziegenfutter, in Woche 2 und 3 hatten dagegen die Ziegen höhere Ra-Werte im Futter. Gegensätzlich dazu verhielt sich die oS ( $p = 0.006$ ), dort hatte das Schaffutter bis Woche 3 einen höheren Gehalt, danach frassen die Ziegen eine Ration mit höherem Anteil an oS als die Schafe. Bis auf die Pflanzenprobe in Woche 3, wo die Werte für beide Tierarten etwa gleich waren, hatte das Ziegenfutter immer einen höheren

Anteil an den Faserfraktionen ADF und ADL ( $p = 0.001$ ). Auch der Bruttoenergiegehalt ( $p = 0.001$ ) der Futterproben war bis auf die dritte Woche bei den Ziegen immer höher.

**Tab. 16:** Mineralstoffgehalt (% der TS) der Rohasche der gesammelten Futterpflanzen

Woche		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Ca %</b>	Schaf	0.042	0.149	0.273	0.152	0.242	0.214	0.259	0.281	0.207	0.289
	Ziege	0.463	0.229	0.277	0.144	0.112	0.190	0.108	0.145	0.106	0.108
<b>P %*</b>	Schaf	0.025	0.019	0.020	0.015	0.018	0.015	0.021	0.025	0.012	0.016
	Ziege	0.014	0.029	0.018	0.014	0.010	0.014	0.012	0.016	0.014	0.009
<b>Mg %</b>	Schaf	0.018	0.035	0.035	0.041	0.052	0.033	0.033	0.039	0.029	0.043
	Ziege	0.052	0.030	0.039	0.042	0.033	0.046	0.027	0.030	0.033	0.041

\* Signifikanter Gruppenunterschied:  $p = 0.037$

Die Analyse der Mineralien Ca, P und Mg aus der Rohasche ergab nur bei P einen signifikanten Gruppenunterschied ( $p = 0.037$ ) zwischen Schaf und Ziege. Bis auf die Futterprobe von Woche 3 und 10 war der Phosphorgehalt im Schaffutter höher. Insbesondere bei der Analyse von Ca kam es zu starken Schwankungen innerhalb der einzelnen gesammelten Proben.

## 5.8. Klima

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Messungen der Wetterstation während des Versuchszeitraumes. Die Wetterdaten wurden analog zu den GPS-Messperioden (siehe 5.3) erhoben.

**Tab. 17:** Wetterdaten während des Versuchszeitraumes nach Michna et al. 2009:

Versuchs- woche	mittlere Temp. (°C)	min. Temp. (°C)	max. Temp. (°C)	Luftfeuch- tigkeit (%)	Summe Niederschlag (mm)	Summe Strahlung (W/m <sup>2</sup> )
2.5	8.65	-1.33	19.45	79.30	104.40	96697.06
4	9.26	1.82	18.25	73.92	19.20	100469.10
5	13.06	6.12	19.92	76.89	31.60	84203.61
6	11.59	1.62	20.85	72.83	30.80	68101.85
7	9.18	1.59	19.63	76.43	62.00	69582.59
8	8.65	-1.06	18.34	81.94	9.80	56751.44
9.5	10.39	0.63	19.95	76.36	4.40	78393.35
10.5	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

## 6. Diskussion

### 6.1. Weide- und Bewegungsverhalten

Beide Tiergruppen waren stets getrennt unterwegs. Dieses Verhalten bestätigt die verschiedenen Fresstypen „Grazer“ und „Browser“, welche unterschiedliche Nahrung bevorzugen.

Wie erwartet zogen die Schafe, um an jüngere Vegetation zu gelangen, in deutlich höhere Lagen als die Ziegen (Hofer et al., 2002). Folglich mussten sie mehr Höhenmeter zurücklegen als die Ziegen. Bei ihren Wanderungen passierten die Schafe auch Zäune. Obwohl Ziegen dafür bekannt sind, dass sie auch sicher scheinende Zäune überqueren können (Gall, 2001), akzeptierten sie den Zaun als Grenze. Dass die Ziegen durchaus in der Lage waren, den Zaun zu umgehen, zeigten sie bei Regen, wenn sie unter ein Vordach des Stalles zurückkehrten, um sich unter diesen Witterungsschutz unterzustellen. Die Motivation ihr Weidegebiet zu verlassen, welches nur mit einzelnen meist stromlosen Drähte umzäunt war, war dagegen anscheinend eher gering.

Nach der sechsten Woche schienen die Ziegen ihre „Lieblingsweide“ gefunden zu haben, da sowohl die maximale Tageshöhe wie auch Tagesstrecke relativ konstant blieben. In diesem Gebiet wuchsen viele Kleinsträucher, die zu der bevorzugten Nahrung des „Browsers“ Ziege gehören. Weiter den Hang hinauf wuchsen vor allem Gräser, was erklären würde, warum nur der „Grazer“ Schaf und nicht die Ziegen höher gezogen sind. Die Behauptung, dass Ziegen höherwüchsige Pflanzen fressen als Schafe, konnte somit bestätigt werden (Negi et al., 1993). Es wurde beobachtet, dass die Ziegen trotz der offensichtlichen Vorliebe für die verschiedenen Kleinsträucher zwischendurch auch verschiedene Gräser und Kräuter frassen. Dieses Verhalten bestätigt Untersuchungen, die zeigen, dass Ziegen eine gemischte Diät bevorzugen, um so die Gefahr von Vergiftungen zu minimieren (Gall, 2001; Duncan und Young, 2002).

Versuche von Duncan et al. (2005) zeigten, dass Ziegen sehr schnell in der Lage sind, Änderungen von sekundären Inhaltsstoffen im angebotenen Futter zu bemerken, und sich den daraus resultierenden Konsequenzen anzupassen. Negative Erfahrungen führen zu einer Umstellung des Futters, während positive Erfahrungen keine Verhaltensänderungen hervorrufen (Duncan und Young, 2002; Duncan et al., 2005). Wird diese Beobachtung auf die Kleinsträucher der Alp übertragen, würde dies bedeuten, dass diese sowohl sehr schmackhaft waren und auch gut verdaut werden konnten, so dass es nicht nötig war, anderes Futter zu suchen. Daraus kann geschlossen werden, dass die Ziegen mit der vorhandenen Vegetation dieses Gebietes alle ihre Bedürfnisse decken konnten.

Dennoch ist es interessant, dass die Ziegen nicht weiter westlich oder östlich in die Legföhrenbestände und Waldgebiete gewandert sind, da sie hier sicher auch sehr

schmackhafte „Browser-Nahrung“ gefunden hätten. Abgesehen von der alpinen Flora wurde allein schon wegen des ausgeprägten Erkundungsdrangs und der Neugier der Tiere erwartet, dass die Ziegen weitere Gebiete erforschen würden. Auch bot das bevorzugte Aufenthaltsgebiet den wasserscheuen Ziegen keinerlei Witterungsschutz. So hätten die Tiere, wenn schon die Neugierde und die Aussicht auf anderes Futter nicht reichten, wenigstens bei schlechter Witterung 200 m westlich in den Wald gehen können. Denn dass Ziegen sehr wasserscheu sind, ungern feuchtes Gras fressen und sich nur widerwillig über schlammigen Boden fortbewegen (Gall, 2001; Porzig und Sambras, 1991), konnte sehr gut beobachtet werden.

Ein weiterer Grund, warum die Ziegen nicht die weitere Umgebung erkundet haben, mag darin gelegen haben, dass den Tieren noch nie ein so grosses Weidegebiet zur Verfügung stand. Als „Alpneulinge“ ohne jegliche erfahrene Alttiere in der Herde wussten sie nicht, wohin sie gehen konnten. So blieben die menschenbezogenen Ziegen lieber in der Nähe des Stalles und der Menschen. Einige Schafe der Herde kannten dagegen das Gebiet aus den Vorjahren, wo sie den kompletten Sommer auf der Alpweide verbrachten und abends nicht eingestallt wurden. Die Ziegen, die die Alp nie ohne abendlichen Abtrieb kennen gelernt hatten, zogen vielleicht auch nicht so weit, weil sie gelernt hatten, dass sie abends wieder zurück mussten. So wurde oft beobachtet, dass sie gegen Nachmittag den Berg hinab Richtung Stall zogen und unten am Tor warteten, während die Schafe nie umkehrten. Die Aussagen, dass niedrige Temperaturen sowohl die Futteraufnahme als auch die Bewegung von Ziegen erhöhen, konnte in dieser Studie nicht bestätigt werden (Bianca und Kunz, 1977; Gall, 2001).

Die Schafe dagegen liessen sich, wie erwartet, nicht von Wind und Wetter beeinflussen. Dass es bis Woche 6 zu einer Abnahme an täglich zurückgelegten Kilometern kam, könnte damit erklärt werden, dass die Schafe sich anfangs zuerst wieder orientieren mussten und ausgiebig das Gebiet erkundeten. Es wurde beobachtet, dass die Schafe dabei dieselben Gebiete wie in den Vorjahren aufsuchten. Solches Ortsverhalten wurde auch von von Wyl et al. (1985) beschrieben. In den ersten Wochen wurde überwiegend die Breite des Gebietes erkundet (Abb. 18), danach stiessen die Tiere, vor allem in höhere Lagen vor (siehe Abb. 16,19-21), wie es auch an den zurückgelegten Höhenmetern ersichtlich ist. Das Gebiet, in dem sie sich zu diesem Zeitpunkt aufhielten, war sehr schmal und seitlich durch Schuttfächer begrenzt, so dass die Tiere primär bergauf gehen mussten (Abb. 19-21), wobei nicht so viele Kilometer zurückgelegt werden konnten. Nach Woche 6 wurden die Wegstrecken wieder länger, vermutlich wurde zu diesem Zeitpunkt das Futterangebot auf dem schmalen Hangstück knapp. Die Tiere begannen nun wieder weitere Strecken östlich durch die Schuttfächer hindurch zu laufen (Abb. 22-25). Auch

Lachica et al. (1997) beschrieben eine Änderung der aufgenommenen Nahrung mit dem jahreszeitlichen Futterangebot. Der nun bevorzugte Hang ist vielfach von Schuttfächern durchzogen und sehr steinig. Dies war vermutlich die Ursache dafür, dass die Schafe nun weitere Strecken zurücklegen mussten, um genügend Nahrung zu finden. Auch nimmt gegen Ende des Sommers der Futterwert der Vegetation ab (Leiber et al. 2006).

Beide Tierarten kamen, wie in der Literatur beschrieben (Gall, 2001; Sambraus, 1978), sehr gut im steilen Gelände zurecht. Im tierartlichen Vergleich stellten sich die Ziegen an sehr steilen Hängen noch etwas geschickter und trittsicherer an. Dies wurde insbesondere beim Abtrieb beobachtet. Trotzdem legten die Schafe signifikant weitere Wegstrecken zurück als die Ziegen. Dies widerspricht Angaben von Negi et al. (1993) und Rahmann (2000), dass Ziegen wesentlich aktiver seien als Schafe. Insgesamt unterstützen die Resultate dieser Studie die Beobachtungen von Kronberg und Malechek (1997), dass Schafe mehr Zeit mit Grasens und der damit verbundenen Laufaktivität verbringen als Ziegen.

Ein Indoor-Experiment an Schafen hat gezeigt, dass die Motivation sich zu einem Futterplatz zu bewegen umso höher wird, je grösser die Menge an qualitativ gutem Heu am Zielort ist (Dumont et al., 1998). Allerdings sinkt die Motivation der Tiere, je länger die dafür zu bewältigende Strecke ist. War die Distanz zu weit, frassen die Schafe lieber das zwar schlechtere, aber ohne Bewegung erreichbare Heu vor Ort. Die Laufmotivation der Schafe wurde also zum einen durch die Länge der Strecke zum Futter, die Menge und Qualität des Futters beeinflusst. Zwar ist dies nur ein Modell, das eventuell nicht repräsentativ für das Verhalten der Tiere über einen kompletten Tag ist, werden diese Ergebnisse auf das vorliegende Experiment übertragen, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Tiere immer relativ zum Futter bewegten. Eine weitere Studie stellte fest, dass Schafe und Ziegen sehr schnell lernen und sich lange Zeit an gute Futterstellen erinnern können (Dumont et al., 1998). Es kann also angenommen werden, dass die Tiere sich nicht wahllos bewegten, sondern zielstrebig bestimmte Vegetationsformen aufsuchten. Die Kosten für die Futtersuche wären somit stets relativ zu dem Nutzen, den die Tiere daraus erlangten.

Im Durchschnitt lagen die Schafe bei ihrer Futtersuche mit ihren absoluten Kilometerzahlen im Rahmen der Literaturangaben (Porzig und Sambraus, 1991). Die angegebene Höchststrecke von 17 km/d wurde jedoch nicht erreicht. Sambraus (1978) gibt Strecken von bis zu 10 km bei Schafen an. In einer anderen Studie aus dem Himalaya stellten Negi et al. (1993) eine durchschnittliche Tracklänge von 6 km beim Schaf fest. Den vorliegenden Ergebnissen am nächsten kommt eine Studie aus dem peruanischen



Hochgebirge, hier werden 4.6 km/d als durchschnittliche Tageswegstrecke für Schafe angegeben (Fierro und Bryant, 1990).

Was die absoluten Kilometerzahlen angeht, lagen die Ziegen teils über (Soumaré, 1981), meist jedoch unter den Angaben der jeweiligen Literatur (Negi et al., 1993; Gall, 2001). Die Angaben von Gall (2001) beziehen sich allerdings auf sehr trockene Gebiete. Es ist bekannt, dass kleine Wiederkäuer in der trockenen Jahreszeit mehr Zeit mit der Futtersuche verbringen als zu feuchteren Jahreszeiten (Kronberg und Malechek, 1997, Lachica et al., 1997; 1999). Es kann davon ausgegangen werden, dass auf der Alp im Gegensatz zu den anderen Studien verhältnismässig mehr Grünfutter in einem kleineren Gebiet zu finden war, und die Tiere daher nicht so weit laufen mussten. Zwei Untersuchungen in unterschiedlichen Gebieten im mediterranen Hochland von Spanien mit Ziegen ergaben ebenfalls weitere durchschnittliche Tagesstrecken von 4.3 km/d mit 168 Höhenmetern und 9.95 km/d mit 500 Höhenmetern (Lachica et al. 1997; 1999). Auch hier könnten die weiteren Strecken mit der trockenen Vegetation erklärt werden. In diesen Versuchen wurden nur an drei Tagen pro Saison die Bewegungsdaten erhoben. Hierbei lief eine Person zu bestimmten Tageszeiten bestimmten Ziegen mit einem Pedometer nach. Es stellt sich die Frage, inwieweit diese 12-Mal jährlichen „Besucher“ das Verhalten der Tiere beeinflusst haben. Es ist vorstellbar, dass die Tiere verstärkt vor den unbekannten Menschen wegzogen. Auch geben diese wenigen Stichproben sicher keine so akkuraten Ergebnisse wie die in dieser Studie täglich über Monate geführten lückenlosen GPS-Daten. Ein weiterer Grund für die Abweichungen könnte darin liegen, dass diese zwei Versuche mit grösseren Tierherden (72 - 350 Tiere / Herde) durchgeführt wurden. Eine grosse Tiergruppe braucht viel mehr Futter und frisst die vorhandene Vegetation schneller ab als eine kleine Gruppe von 15 Tieren und muss demnach auch schneller und weiter ziehen. Dennoch zeigten diese zwei Versuche, die etwa unter denselben landschaftlichen und klimatischen Konditionen stattgefunden haben, dass sich die Tiere in ihrem Bewegungsverhalten sehr individuell ihrer Umgebung und der Jahreszeit anpassen. Selbst Weiden mit ähnlichen Bedingungen sind bezüglich des Bewegungsverhaltens und dem daraus resultierenden Energiebedarf schwer vergleichbar. Um aussagekräftige Richtwerte für ein Weidegebiet zu erhalten, sollte eine individuelle Beobachtung der Tiere in dem jeweiligen Gebiet statt finden (Lachica et al. 1997; 1999).

### **6.1.1. Ökologische Aspekte**

Alpweiden stellen nicht nur eine Futterquelle für kleine Wiederkäuer dar, sondern werden durch die Beweidung verschiedener Tiere auch erhalten oder verändert. So ändern sich

die Zusammensetzung des Bodens, der Pflanzengesellschaften und die Biodiversität (Edwards et al., 2004; Körner et al., 2006; Mayer et al., 2006).

Die vorliegende Studie zeigt, dass eine Beweidung mit Ziegen sinnvoll für die Entbuschung sein kann. Am Albulapass gelten vor allem *Juniperus communis ssp. nana* und *Pinus mugo ssp. mugo* als Problembüsche, beide Büsche wurden gerne von den Ziegen gefressen. Auch fressen Ziegen und Schafe gerne Disteln, welche als häufiges Unkraut auf Alpweiden gelten. Sie sind futterbaulich wertlos und werden von Pferden und Rindern verschmäht (Kneubühl und Roder, 2008). Leider wurde aber auch die schützenswerte Silberdistel mit gefressen. Der Blaugras-Horstseggenrasen hat eine geringe alpwirtschaftliche Bedeutung, als sehr blumenreiche Pflanzengesellschaft enthält er aber verschiedene schützenswerte Pflanzenarten wie etwa Edelweiss, Enzian und Orchideengewächse (Schubiger et al., 1999). Die Schafe wurden beobachtet, wie sie gezielt Blüten abrupften, vermutlich ernteten sie dabei auch die eine oder andere geschützte Pflanze. Bei den Wanderungen durch die Geröllfelder verursachten die Schafe teilweise leichte Erosionen. Leider konnte in dieser Studie nicht untersucht werden, ob sich der Boden auch durch den Tritt verfestigte.

Im Bezug auf die bevorzugte Weidefläche stellten weder die Schafe an den hohen Hanglagen noch die Ziegen in den Kleinsträuchern eine Konkurrenz für andere Haustiere dar. Auch Negi et al. (1993) stellte im Himalaya fest, dass kleine Wiederkäuer Nischen besetzen, die von anderen Haustieren nicht genutzt werden. Trotz der eventuellen Aufnahme geschützter Pflanzen ist erwiesen, dass gutes Weidemanagement mit der richtigen Tierart und Rasse die Biodiversität eines Gebietes fördern und erhalten kann (Andrighetto et al., 1993; Spehn et al., 2006; Isselstein et al., 2007; Dumont et al., 2009). Eine angemessene Herdengrösse und das Abtrennen besonders schützenswerter Zonen, wie von Stadler und Wiedmer (1999) vorgeschlagen, werden dabei auf jeden Fall als sinnvoll erachtet.

### **6.1.2. Eignung und Messgenauigkeit der GPS Empfänger**

Die GPS Genauigkeit liegt heute bei unter 10 m. Die verwendeten GPS-Empfänger arbeiten mit WAAS (Wide Area Augmentation System). Dieses ist Teil eines Erweiterungssystems zur Verbesserung des amerikanischen GPS. Durch Zusatzsatelliten, die in gleicher Frequenz wie GPS senden, wird die Genauigkeit der Angaben erhöht. Der Hersteller gibt somit eine Zuverlässigkeit von 2.5 m an. Hohe Gebäude, Felsvorsprünge oder Wasserdampf bzw. andere Partikel in der Atmosphäre können zu Messungenauigkeiten führen. Dieses ist allerdings sehr selten (Bajaj et al., 2002). GPS Satelliten sind rund 11.000 Meilen weit weg, daher kann es bei falscher Berechnung der

Signalsendezeit zu Standortfehlern von bis zu 200 Metern kommen. Bei sehr hügeliger Landschaft können die Sendefrequenzen der GPS-Geräte in bis zu 2.5% der Messzeit gestört werden (Rutter et al. 1997). Trotz solcher Ausreisser zeigten die Studien doch, dass das GPS sehr geeignet ist, um Schafe zu „tracken“. Auch in der vorliegenden Studie konnte dies bestätigt werden. Zwar kam es hin und wieder zu einzelnen grossen Ausreissern, die aber bei der Auswertung in den entsprechenden Programmen erkannt werden konnten. Beobachtungen der Tiere tagsüber entsprachen den mittels GPS erstellten Karten. Kleine Abweichungen von wenigen Metern konnten allerdings nicht korrigiert werden. Auch muss bei allen Kilometerangaben stets berücksichtigt werden, dass die GPS-Empfänger nur jede Minute einen Trackpoint aufgezeichnet haben. Bewegten sich die Tiere allerdings in einer Minute sehr zügig, z.B. in einer grossen Kurve, wich die GPS-berechnete Wegstrecke von der wirklich zurückgelegten Wegstrecke ab. Gleiches gilt für zurückgelegte Höhenmeter; alles was die Tiere innerhalb einer Messminute hoch und wieder runter gingen, konnte nicht gemessen werden. Die Werte sind daher Schätzwerte und nicht als absolute Zahlen anzusehen. Bis auf den morgendlichen Auf- und den abendlichen Abtrieb haben sich beide Tiergruppen, wenn auch die Schafe mehr als die Ziegen, sehr langsam und stetig ohne viele Richtungsänderungen innerhalb eines Messintervalles fortbewegt.

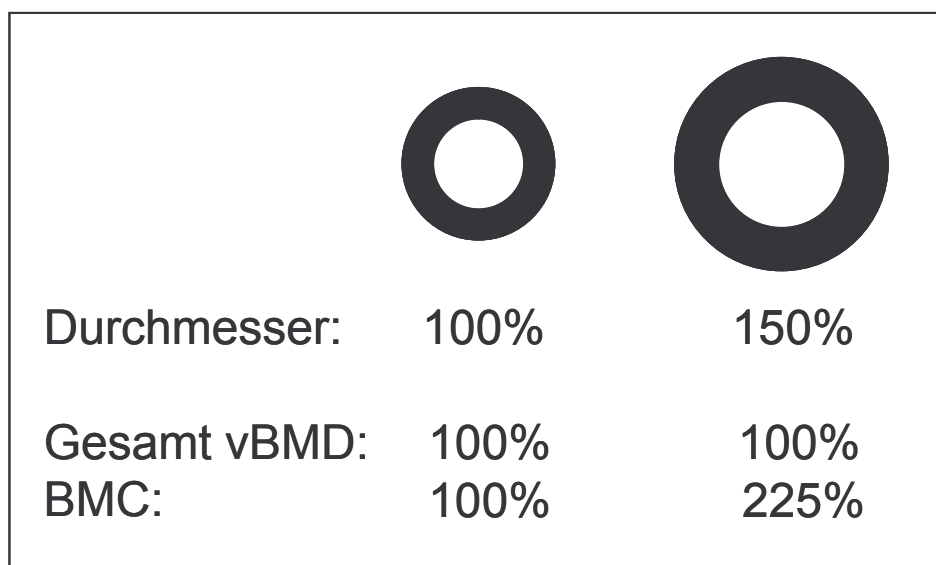
Wegen der oben genannten Messungenauigkeit von 2.5 m war es nicht möglich, mittels GPS die Ruhezeiten der Tiere zu analysieren. Auch Lachica und Aguilera (2005) bemerkten, dass selbst bei ruhenden Tieren eine Geschwindigkeit von 0.2 m berechnet wurde. Der grosse Vorteil der vorliegenden Geräte gegenüber bisherigen Studien ist, zum einen die bessere Messgenauigkeit, die kleine Grösse und das geringe Gewicht (40 g) der Geräte. Damit kann eine Berücksichtigung von eventuellen extra Energiekosten für das Tragen der Geräte vernachlässigt werden. Bisher verwendete GPS-Geräte wogen teils noch 1.7% vom Körpergewicht, andere Messgeräte waren sogar noch viel schwerer. Teils wurden sogar Verhaltensänderungen der Tiere durch das Tragen dieser Messgeräte festgestellt (Lachica und Aguilera, 2005). Diese Probleme konnten in der vorliegenden Studie ausgeschlossen werden.

## **6.2. Knochen, Knorpel und Mineralstoffwechsel**

### **6.2.1. pQCT Messungen**

Eine gesteigerte Bewegungsaktivität, welche durch die GPS-Messungen auf der Alp belegt wurde, soll zu einer Anpassung des Gewebes führen (Beaupre et al., 1990; Carter, 1987; Liebich, 2004; Turner und Pavalko, 1998). Um zu beurteilen, was am Knochen passiert, müssen die verschiedenen Ergebnisse der pQCT im Gesamtbild betrachtet

werden. So ist die Knochenmasse (BMC) definiert als die Masse der Mineralien im gesamten Knochen (mg) oder als die Masse der Mineralien pro Einheit Knochenlänge (mg/cm) (Schönau et al., 2002). Damit ist der BMC abhängig von der Knochengrösse. Die areale Knochendichte (aBMD) ist definiert als Mineralmasse des Knochens geteilt durch ein bestimmtes Abbildungsgebiet in einer bestimmten Richtung (mg/cm<sup>2</sup>). Damit ist sie direkt von der Durchleuchtungsstrecke durch den Knochen und somit auch von der Knochengrösse abhängig. Da alle DEXA Studien mit dieser Masseinheit arbeiten und auch nicht zwischen trabekulärem und cortikalem Knochen unterscheiden, können diese letztlich nicht mit Werten dieser Studie verglichen werden. Selbst wenn viele DEXA Studien bei Bewegung eine Zunahme der BMD angeben, handelt es sich dabei immer um die aBMD. Was tatsächlich im Knochen passiert, kann nicht beurteilt werden. Nach Schneider et al. (2004) können pQCT und DEXA Werten ohne eine Korrektur der Knochenlänge nicht verglichen werden. Aufgrund dieser Tatsache kommt es zu vielen widersprüchlichen Angaben in der Literatur. Beispielsweise würde eine Vergrösserung des Knochenumfanges sich bereits in einer Zunahme der aBMD zeigen, ohne dass es zu einer Änderung der eigentlichen vBMD käme. Im nachfolgenden werden die Ergebnisse daher nur mit anderen pQCT Studien verglichen und diskutiert.



**Abb. 44:** Abbildung zweier Querschnitte durch verschieden grosse Knochen an der Diaphyse. Der rechte Knochen ist um 50% vergrössert, dabei nimmt auch dessen BMC zu, obwohl die vBMD gleich bleibt.

pQCT ist die einzige Messmethode, die mit der volumetrischen Knochendichte (vBMD), welche unabhängig von der Grösse des Knochens ist, als Masseinheit arbeitet. Definiert wird die vBMD als Mineralienmasse geteilt durch das Volumen, das vom Periost des Knochens eingeschlossen wird (Schönau et al., 2002). Allerdings kann mit der vBMD keine Aussage über die Stabilität des Knochens angegeben werden, diese ist nur möglich in Kombination mit der Messung des Muskelmassenquerschnittes.

Bei zwei Stäben mit gleicher Dichte ist der dünnere Stab nicht so stabil wie der dicke Stab, auch wenn er aus demselben Material besteht. Veranschaulichen soll dies die Abbildung 44.

Wie bereits in anderen Studien festgestellt (Liesegang et al., 2006; 2007), hatten die Schafe im Vergleich zu den Ziegen einen höheren BMC und eine höhere BMD. Der Grund liegt in der dickeren Cortex der Schafsknochen. Obwohl sich die Ziegen weniger bewegt haben, zeigten sich bei Schaf und Ziege in etwa die gleichen Veränderungen am Knochen. Nach Schießl und Willnecker (2000) muss Bewegung zu einer Mindestverformung am Knochen führen, da es sonst zu keiner Steigerung der Knochenmasse kommt. Da vor allem „high-peak-strains“ (siehe 3.5.5.3.) knochenformend wirken (Rubin und Lanyon, 1985; Skerry und Lanyon, 1995), kann davon ausgegangen werden, dass beide Tierarten einen etwa gleichen Anteil dieser „high-peak-strains“ erfahren haben. Normales Gehen beim Weiden wird aufgrund der grossen Wiederholung bei gleicher Intensität und geringer Belastung zu den „low-peak-strains“ gerechnet und ist daher kaum knochenformend. Auch Skerry und Lanyon (1995) stellten fest, dass gleichmässige langsame Bewegung von Schafen auf dem Laufband nicht ausreicht, um den Knochenaufbau zu stimulieren. Verhaltensmuster, welche „high-peak-strains“ verursachen (massive Beschleunigung, Sprünge, abrupte Stopps und plötzliche Wendungen; Moreno et al., 2008), wurden vor allem beim Abtrieb, insbesondere bei den Ziegen beobachtet. Zwar hatten die Schafe meist eine weitere Strecke beim Abtrieb zu bewältigen, dabei hüpfen sie aber nicht so viel und wild herum wie die Ziegen. Aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens wäre daher vorstellbar, dass obwohl die Schafe weitere Strecken liefen, trotzdem in etwa die gleiche Menge an „high-peak-strains“ auf die Knochen beider Tierarten wirkten.

Die Messungen an der Diaphyse des Knochens zeigen, dass sich die Knochengrösse nicht verändert hat, da der Gesamtdurchmesser der Diaphyse gleich blieb. Nur die Cortex ist breiter geworden. Dieses bestätigt pQCT-Studien von Haapasalo et al. (2000) und Joo et al. (2003), auch hier führt Bewegung zu einer Zunahme der kortikalen Dicke. Auch Hiney et al. (2004b) fanden in ihrer Studie an Kälbern, die täglich bewegt wurden, eine grössere totale vBMD, durch eine Zunahme der Cortikalisfläche. Acht Wochen nach Rückkehr von der Alp, kam es, vermutlich durch die fehlende Bewegung, wieder zu einer Abnahme der kortikalen Dicke bei beiden Tierarten. Es wird davon ausgegangen, dass die Tiere durch die Bewegung an Muskelmasse zugelegt haben, somit werden auch die Aussagen von Schönau (2002) und Haapasalo et al. (2000) bestätigt, dass eine enge Korrelation zwischen Muskel- und Cortikalisfläche besteht. Weiterhin kann die positive Korrelation zwischen BMC und Knochenstärke (Haapasalo et al., 2000) die Zunahmen der



totalen und cortikalen BMC durch die Zunahme des cortikalen Durchmessers erklären (Abb. 32 und 33).

Schwieriger sind die Werte der Knochendichte zu erklären. Es kann angenommen werden, dass die Dichte der Cortikalis unter Bewegung etwa gleich bleibt bzw. höchstens geringgradig zunimmt. Somit widerspricht diese Studie weder der von Haapasalo et al. (2000), wonach sich die Dichte der Cortikalis nicht bei vermehrter Bewegung ändert, noch der von Rico et al. (1994), wo eine Zunahme der vBMD an der Cortikalis durch Bewegung festgestellt wurde. Beide Studien wurden am Mensch durchgeführt, Rico et al., mass die Knochendichte allerdings nur an einem Punkt und nicht an mehreren. Es ist nicht auszuschliessen, dass der menschliche Knochen oder der Knochen selbst an unterschiedlichen Stellen anders reagiert (Biewener et al. 1983; Notomi et al. 2001; 2002; Plochoki et al. 2008). Auch in dieser Studie kam es zu unterschiedlichen Ergebnissen an den verschiedenen Messpunkten von Epi- und Diaphyse. Wie oben bereits erwähnt, ist sicher auch die Intensität der einwirkenden Kraft entscheidend. Um eine endgültige Aussage treffen zu können, ob es nun durch Bewegung zu einer Zunahme der vBMD an der Cortikalis kommt, müssen daher noch weitere Studien durchgeführt werden, die die Grundregeln der Anpassung von Knochen auf mechanische Stimuli (siehe 3.5.5.3.; Turner, 1998) berücksichtigen.

An der Diaphyse besteht der Knochen überwiegend aus Markraum und der Cortikalis, der trabekuläre Knochen ist nur zu einem sehr geringen Anteil vorhanden. Daher wurde davon ausgegangen, dass die totale BMD der der cortikalen BMD entspricht. Die totale vBMD an der Diaphyse nahm bei den Schafen unter der Bewegung auf der Alp signifikant zu. Dieses liegt vermutlich an der Zunahme der cortikalen Dichte. Die Ziegen reagieren scheinbar nicht so schnell auf äussere Stimuli, so dass erst zeitverzögert eine Reaktion am Knochen messbar war. Letztlich zeigen auch die Knochenmarker, dass es bei den Ziegen auf der Alp, gerade anfänglich, primär zu einem Knochenab- und nicht zu einem Aufbau kam. Vermehrter Aufbau des Knochens war vor allem nach Alpabfahrt sichtbar.

Auch an der Epiphyse wurden nicht beide Knochenanteile gemessen. Da die Spongiosa an dieser Stelle den Hauptanteil des Knochens darstellt, während die Cortikalis nur als ein dünner Rand vorhanden ist, wurde hier, bis auf die Messung der Dicke, nur der gesamte Knochen und der trabekuläre Anteil beurteilt. Auch hier kam es zu teils stark widersprüchlichen Ergebnissen zwischen Messungen des totalen und des trabekulären Knochens. Die Werte widersprachen sich an der Epiphyse noch mehr als an der Diaphyse. Da der cortikale Durchmesser signifikant zunahm, ist anzunehmen, dass zumindest an der Epiphyse, sowohl der trabekuläre wie auch der cortikale Knochen entscheidend die Dichtemessungen der totalen BMD beeinflussen können. An der

Epiphyse sollten daher immer beide Knochenanteile mitgemessen werden, um so differenziertere Aussagen treffen zu können.

Die Alpfung der Tiere führte an der Epiphyse, neben einer Zunahme des cortikalen Durchmessers, zu einer Vergrößerung des gesamten Knochenquerschnittes. Wie auch bei der Diaphyse bestätigt dieses, dass Bewegung zu einer Zunahme der Knochenstabilität führt. An der Epiphyse liegt die Hauptursache hierfür in einer Zunahme der Knochengrösse und einer Dickenzunahme der Cortex. Auch Haapasalo et al. (2000) konnten eine Zunahme der Knochengrösse durch vermehrte Belastungen nachweisen.

Die Zunahme des totalen BMC an der Epiphyse kann auf die Vergrößerung des Knochendurchmessers und eine leichte Verdickung der cortikalen Wand zurückgeführt werden. Zunächst scheint es nicht erklärbar, dass der trabekuläre BMC auf der Alp abnimmt. Dieses könnte daran liegen, dass bei Grössenzunahme des Knochens, der trabekuläre Anteil etwa gleich gross geblieben ist. Es wird angenommen, dass sich eine Änderung des Grössenverhältnisses, wobei der Spongiosa-Anteil gleich bleibt, in einer Abnahme des trabekulären BMC darstellen könnte.

Bei beiden Tierarten kam es an der Epiphyse zu keiner signifikanten Zunahme der trabekulären BMD. Dieses bestätigt die Vermutung, dass der trabekuläre Anteil des Knochens vermutlich weder an Umfang noch an Dichte zunahm. Eigentlich wurde dies nicht erwartet, da der trabekuläre Knochen schneller auf metabolische Stimuli reagieren und eine 25% höhere Umbaurate hat als cortikaler Knochen (Frost, 1964; Swaminathan, 2001). Gut möglich wäre, dass es zu einem verstärkten Umbau gekommen ist, sich dieser aber nicht spezifisch auf die Dichte ausgewirkt hat. Auch Veränderungen in den Knochenmarkern wiesen auf einen verstärkten Knochenumbau hin.

Es wird angenommen, dass die Bewegung die Hauptursache für die Veränderungen am Knochen war. Aus der Humanmedizin ist bekannt, dass eine hohe Calciumzufuhr (Lambert et al., 2008), förderlich für die Mineralieneinlagerung im Knochen sein kann. Es ist allerdings auch bekannt, dass die alleinige Gabe von Ca oder Vitamin D, ohne die leitende Funktion der Muskeln, zu keinen Änderungen am Knochen führen kann (Bass et al., 2005; Rauch und Schönau, 2001). Schon Hüttenmoser (2007) stellte auf der Alp Weissenstein eine erhöhte Calciumzufuhr aufgrund der geographischen Lage auf dem Kalksteinmassiv im Gegensatz zu Tieren im Tal fest. Das Ca:P Verhältnis beim Talfutter war in seiner Studie bei 1.34:1, während das Verhältnis des Alpfeeders bei 3.35:1 lag. Sicherlich haben die vermehrten Ca Aufnahmen durch das Futter und die erhöhte Vitamin D Bildung durch die verstärkte UV-Strahlung positiv mit auf den Knochen einwirken können.

Sowohl für die Dia- als auch Epiphyse gilt, dass für alle Werte immer noch Messfehler und geringe Abweichungen von der Messposition berücksichtigt werden müssen. Zwar liegen Präzisionsfehler nur bei 1-3% (Genant et al., 1996), dieses umfasst allerdings keine möglichen Abweichungen bei Wiederholungsmessungen am selben Knochenpunkt. Gerade an der Epiphyse können Messfehler durch Abweichungen vom Messpunkt nicht ausgeschlossen werden.

Weiterhin muss bedacht werden, dass der Umbauprozess des Knochens 3-4 Monate dauern kann, und dieses ist eventuell erst nach weiteren 4 Monaten mit bildgebenden Verfahren darstellbar (Bass et al., 2005). Insgesamt waren die Tiere nur 3 Monate auf der Alp und die letzte Messung fand 2 Monate danach statt. Dies könnte erklären, warum die totale BMD der Ziegen erst acht Wochen nach Rückkehr von der Alp anstieg. Daraus kann gefolgert werden, dass Schafe einen schnelleren Knochenumbau haben als Ziegen, da bei den Schafen bereits direkt nach der Alp eine Veränderung feststellbar war. Gründe hierfür könnten in einem unterschiedlichen Ca-Homöostase-Mechanismus von Schaf und Ziege liegen. Liesegang und Risteli (2005) spekulierten, ob Ziegen eine längere Zeit zum Einbau von überschüssigem Ca im Knochen benötigen als Schafe, oder ob sie mehr überflüssiges Ca mit der Niere ausscheiden.

Nach Immobilisation sind Massenverluste an der Epiphyse stärker ausgeprägt als an der Diaphyse (Bass et al., 2005). Wenn umgekehrter Rückschluss für Bewegung gelten würde, könnte dieses erklären, warum es nur an der Epiphyse und nicht an der Diaphyse zu einer Vergrößerung des Gesamtdurchmessers kam. Insgesamt widerspricht dieses aber den Aussagen von Biewener et al. (1983) und Plochoki et al. (2008), dass es primär proximal an der Gliedmasse zu verstärkter Belastung kommt. Allerdings bezogen sich deren Untersuchungen auf andere Tierarten und auf zwei verschiedene Knochen (Biewener: Radius und Metacarpus beim Pferd; Plochoki: Femur und Tibia in der Maus) an einer Gliedmasse. So ist beispielsweise der Radius durch seine gebogene Form mehr einer Biegeverformung ausgesetzt als der von uns gemessene relativ gerade Metatarsus (Moreno et al., 2008). Um diese Fragestellung zu klären, wäre es interessant, eine Vergleichsstudie mit weiteren Messungen, auch an weiter proximal liegenden Knochen der Gliedmasse durchzuführen.

Unterschiedliche Werte von Dia- und Epiphyse könnten eventuell auch im direkten Zusammenhang mit den Muskelansatzstellen am Knochen gesehen werden. Sowohl Haapasalo et al. (2000) wie auch Lai et al. (2005) zeigten, dass Ergebnisse je nach Belastungsintensität und ansetzenden Muskeln eines Bereiches variieren. So ist gut vorstellbar, dass an dem Messpunkt der Epiphyse beispielweise mehr Muskeln ansetzen als an dem der Diaphyse. Folglich käme es durch Bewegung verursachte Zugbelastung an

dieser Stelle zu einer grösseren Stimulation des Knochens, welche zu einer Vergrösserung des Epiphysendurchmessers führen könnte. Die Zunahme des kortikalen Durchmessers könnte dann beispielsweise primär auf eine überwiegende Kompressionsbelastung des Knochens während des Laufens zurückgeführt werden. Demnach kann darüber spekuliert werden, ob Kompressionsdruck primär zu einer Zunahme der Cortexdicke und Zugbelastung zu einer Zunahme des gesamten Knochendurchmessers führt. So stellte Main (2007) in einigen Cortexanteilen grösseren longitudinalen Druck fest, histomorphologisch konnten allerdings keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Knochenabschnitten gesehen werden.

Letztlich bestätigt diese Studie, dass moderates Training die Knochenmasse erhöhen kann (Goseki et al., 1995; Davicco et al., 1999; Mori et al., 2003; Hagihara et al., 2005; Rakovac et al., 2007; Tobias et al., 2007). Auch die Aussage, dass mechanische Belastung einen grossen Einfluss auf die Grösse und Struktur mit der daraus resultierenden Knochenstärke hat (Frost, 1997; Turner, 2000; Schönau, 2002; Bass et al., 2005), lässt sich mit diesen Resultaten belegen.

## **6.2.2. Parameter des Knochen- und Knorpelstoffwechsels im Blut**

### **6.2.2.1. Mineralstoffe (Calcium, Phosphor, Magnesium)**

Die Serum-Ca- und P-Konzentrationen werden streng reguliert, Abweichungen werden sofort durch eine vermehrte intestinale Aufnahme oder verstärkte Ausscheidung über Kot und Harn ausgeglichen. Beide Werte eignen sich daher nicht, um eine Aussage über die Knochenmineralisation zu fällen.

Die Serum-Ca-Werte lagen bei beiden Spezies im Referenzbereich (Schaf: 2.3-2.8 mmol/l; Ziege: 2.2-2.7 mmol/l nach Tschuor et al. 2008) oder leicht darüber. Erklärt werden kann dieses durch die geographische und geologische Lage der Alp auf einem Kalksteinmassiv. Die Vegetation enthält viel Ca, dies ist auch sichtbar an den vielen „kalkzeigenden“ Pflanzen. Auch in der Studie von Hüttenmoser (2007) wurde ein vermehrter Ca- und verminderter P-Gehalt in den Pflanzen der Alp Weissenstein im Vergleich zur Vegetation im Tal festgestellt. Der empfohlene Ca-Bedarf für nicht-laktierende Schafe und Ziegen liegt je nach Grösse des Tieres zwischen 2.5-3.5 g Ca pro Tier und Tag (Daccord und Kessler, 1999). Dieser sollte durch die gegebene Vegetation leicht gedeckt sein (siehe Tab. 16). Die Schafe wiesen stets deutlich höhere Ca-Werte (in Serum, Futter, Kot) als die Ziegen auf. Grund hierfür mag das unterschiedliche Weideverhalten sein. So stellten Schubiger et al. (1999) in Blaugrashorstseggenrasen einen höheren Ca-Gehalt als in Milchkrautweiden oder Borstgrasweiden fest. Der Alpenwegerich (*Plantago alpina*), den die Schafe besonders gerne fressen, weist ebenfalls einen recht hohen Ca-Gehalt von 8 g/kg TS auf (Schubiger et al., 1999).



Obwohl die Tiere etwa gleiche Ausgangskonzentrationen an P im Serum hatten, sank dieser Wert im Laufe der Alpung ab. Während die P-Werte der Schafe dabei immer noch im Referenzbereich lagen, sank der P-Spiegel bei den Ziegen von der fünften Woche der Alpung unter die Referenzwerte (1.2-2.9 mmol/l nach Tschuor et al. 2008). Es ist bekannt, dass nur optimales Management eine ausreichende P-Versorgung der Tiere bei Weidehaltung zu gewährleisten vermag, unter extensiven Bedingungen kann der Bedarf meist nicht durch die Tiere gedeckt werden (van Soest, 1994). Auch hier kann das Bewegungsverhalten erklären, warum die Schafe in diesem Falle besser in der Lage waren ihren Bedarf zu decken. Die Ziegen stiegen ab der sechsten Woche nicht höher auf und hielten sich überwiegend im unteren Hangbereich auf. Hier war das Wachstumsstadium der Pflanzen bereits sehr weit fortgeschritten. Da der P-Gehalt von Gräsern mit zunehmendem Vegetationsstadium abnimmt (Kirchgeßner, 2004), hatten die immer höher steigenden Schafe den Vorteil, weiterhin stets frisches junges Grünfutter fressen zu können. Diese Annahme wird auch durch die Futterproben der Schafe, die stets mehr P enthielten, bestärkt.

Trotz relativ gleichwertiger Aufnahme von Mg mit dem Futter und geringerer Ausscheidung mit dem Kot, fiel der Mg-Wert der Ziegen von Woche 5 an unter den Referenzwert von 0.9-1.4 mmol/l (Tschuor et al., 2008). Im Gegensatz dazu blieben die Werte der Schafe immer im Referenzbereich von 0.8-1.1 mmol/l. Zwar sind grosse Schwankungen des Magnesiumgehaltes im Serum nichts Ungewöhnliches (von Engelhardt und Breves, 2000), letztlich wurde aber trotzdem erwartet, dass auch die Ziegen im Referenzbereich bleiben würden. Eine Ursache für das nicht vorhandene Magnesiumdefizit bei den Schafen könnte im Zusammenhang mit dem Kaliumgehalt stehen; Weidegras mit hohem Kaliumgehalt kann zu Veränderungen des Na:K Verhältnis im Pansen führen. Durch einen zu hohen K-Anteil kann es ebenfalls zu Absorptionsstörungen kommen, die in ausgeprägten Fällen auch zu dem Krankheitsbild der Weidetetanie führen können (Kirchgeßner, 2004). Der Kaliumgehalt wurde in dieser Studie allerdings nicht gemessen. Letztlich können die Schwankungen des Magnesiumgehaltes hier nicht genau erklärt werden.

#### **6.2.2.2. Vitamin D**

Aufgrund der Höhenlage, der stärkeren UV-Strahlung und der sommerlichen Jahreszeit wurde eine Erhöhung der Vitamin D Konzentration im Serum erwartet (Blumthaler et al., 1992). Auch soll Bewegung, zumindest bei Ratten, zu einer Steigerung des 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vit D (1.25 Vit D) Gehaltes im Serum führen (Iwamoto et al., 2004).

Bei den Ziegen traf dieses auch wie erwartet zu. Interessanterweise kam es bei den Schafen zu keinen Änderungen, erst gegen Ende der Alpung kam es zu einem signifikanten Anstieg. Bisher ist nicht bekannt, dass es zu einer stressbedingten

Ausschüttung von 1.25 Vit D kommen kann. Dieses wäre ein interessanter Aspekt, da die Blutproben in Woche 12 direkt nach dem Transport genommen wurden. Auch in einer ähnlichen Studie von Hüttenmoser (2007) kam es bei den Versuchsschafen weder im Tal noch auf der Alp im Verlaufe des Sommers zu einem Anstieg von 1.25 Vit D im Serum. Der einzige signifikante Anstieg von 1.25 Vit D im Serum erfolgte hier, identisch zu diesem Versuch, gegen Ende der Weidesaison nach erfolgtem Transport.

Es besteht kein Zweifel daran, dass die Tiere genügend Strahlung ausgesetzt waren. So litten die Ziegen anfangs unter Sonnenbränden an Euter und Rücken und auch die Schafe hatten sonnenverbrannte Ohren und Gesichter, während der restliche Körper durch das Vlies gut geschützt war. Von anderen Tierarten ist bekannt, dass weniger Vitamin D Aktivität in der Haut nachweisbar ist, je dicker und dichter das Haarkleid ist (Quarterman et al., 1964). Eigentlich sollte aber eine kleine Körperfläche wie der Kopf des Schafes genügen, um ausreichend 1.25 Vit D bzw. 25-OH Vit D zu synthetisieren. Trotzdem stellt sich die Frage, wie gut das Schaf überhaupt in der Lage ist, Vitamin D in der Haut zu synthetisieren. So ist beispielsweise von Hund und Katze bekannt, dass diese kein Vitamin D in der Haut mittels UV-Licht bilden können (How et al., 1994; Morris, 1999). Rindern ist dieses zwar möglich, aber die UV-Strahlung ist nicht in der Lage, durch das dichte Haarkleid zu dringen (Bianca und Wegmann-Bosshardt, 1974). Dass Schafe durchaus in der Lage sind Vitamin D mittels UV-Licht zu synthetisieren, zeigt sich aber am Anstieg von 25-OH Vit D in dieser Studie, einer Untersuchung von Smith und Wright (1980) und Hüttenmoser (2007).

Die höchsten Werte ergaben die Probenentnahmen Ende August. Diese Werte können durch saisonale Schwankungen mit erhöhter UV-Strahlung im Sommer erklärt werden (Leiber et al., 2005b; Smith und Wright, 1984). Mit Abnahme der Strahlungsmenge sank anschliessend auch wieder der 25-OH Vit D Wert. Das mit der Nahrung aufgenommene 25-OH Vit D<sub>2</sub> ist dagegen unabhängig von der UV-Strahlung. Generell sind Pflanzen aber eine schlechte Quelle für Vitamin D. Die Ausnahme bildet Goldhafer, welcher allerdings nicht auf der Alp Weissenstein anzutreffen ist. Junge Gräser haben einen geringeren Gehalt, in älteren Vegetationsstufen befindet sich dagegen mehr 25-OH Vit D<sub>2</sub>. Die höchsten Vitamin D Gehalte sind auch hier im Sommer zu finden (Smith und Wright, 1984; Quarterman et al., 1964) und könnten daher im gewissen Grad auch zum Anstieg von 25-OH Vit D beigetragen haben. Horst und Littledike (1982) vermuten sogar in der Nahrung die Hauptquelle für Vitamin D beim Schaf, da die Photosynthese stark durch das Vlies der Tiere limitiert ist. Letztlich ist aber unbekannt, wie wichtig die verschiedenen Vitamin D Ressourcen für das Schaf sind.

Interessanterweise verhielten sich die Werte von 25-OH Vit D und 1.25 Vit D bei der Ziege gerade zu gegensätzlich. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die Ziegen das gebildete 25-OH Vit D schneller in der Niere zu 1.25 Vit D umwandeln. Dadurch würden die 25-OH Vit D Werte sinken, während 1.25 Vit D im Serum ansteigen könnten. Das über den erhöhten 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D Spiegel aktivierte Parathormon würde zu einer gesteigerten Ca und P Absorption im Dünndarm führen. Dieses würde auch die niedrigeren Werte von Ca und P bei den Ziegen erklären. Die Schafe dagegen scheinen das in der Leber gebildete 25-OH-Vit D nicht direkt umzuwandeln, was den gleichbleibenden 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vit D Serumspiegel und auch stabileren Ca und P Spiegel erklären könnte. Auch Quarterman et al. (1964) vermuteten, dass Schafe nicht in der Lage sind Vitamin D zu lagern. Es ist bekannt, dass ein geringer P-Gehalt zu einem Anstieg von 1.25 Vit D führen kann (von Engelhardt und Breves, 2000). Auch ist ein Zusammenhang mit dem Ca-Haushalt der Tiere wahrscheinlich. Die Aufnahme im Knochen und Darm wird von den 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D und PTH gesteuert. Wenn das Serum Ca erhöht ist, wie es bei den Tieren dieser Studie der Fall war, wird die 1.25 Vit D und PTH Produktion reduziert (von Engelhardt und Breves, 2000). Auch Liesegang und Risteli (2005) stellten fest, dass die 1.25 Vit D-Konzentration von Schafen und Ziegen, die ein Futter mit hoher Ca-Konzentration erhielten, tiefer war, als bei Tieren, die eine Ration mit bedarfsgerechter Ca-Konzentration erhielten. Eine bedarfsgerechte Ca-Konzentration scheint die aktive Ca-Absorption via Vitamin D zu fördern. So könnte die hohe Ca-Versorgung bei den Schafen den Anstieg von 1.25 Vit D verhindert haben.

#### **6.2.2.3. Knochenmarker (bAP, OC, CTX) und Knochenindex (OC / CTX)**

Wie bei vorherigen Studien auch (Liesegang et al., 2003; Liesegang und Risteli, 2005) hatten die Ziegen höhere OC-Werte als die Schafe. Eine anfängliche starke Abnahme des OC-Serum-Wertes, wie sie von Hüttenmoser (2007) in einer Studie an gealpten wachsenden Jungschafen beschrieben wurde, konnte hier beim ausgewachsenen Schaf nicht bestätigt werden. Dieses ist nicht weiter verwunderlich, da die OC-Konzentration während des Wachstums abnimmt. OC steigt bei starker Bewegung an (Power und Fottrell, 1991). Gerade die Schafe legten anfangs sehr weite Strecken zurück, womit der anfängliche Anstieg des Wertes bei den Schafen erklärt werden kann. Der anfängliche Abfall bei den Ziegen kann dagegen nicht erklärt werden, zwar bewegten sie sich weniger als die Schafe, aber gewiss auch mehr als vorher im Tal. Eventuell kann hier der starke 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D Anstieg der Ziegen einen Einfluss gehabt haben. Nach Suda et al. (2003) käme es bei sehr hohen Dosierungen von 1.25 Vit D zu einer Stimulation der Knochenresorption, physiologische Dosierungen dagegen fördern die Ca Absorption im Darm und somit auch den Knochenaufbau. Circadiane Schwankungen (Liesegang et al.,

2003) der Osteocalcin-Konzentrationen können ausgeschlossen werden, da die Blutprobenentnahmen immer zur selben Tageszeit erfolgten.

Es ist bekannt, dass geringere Phosphoraufnahme mit dem Futter zu erniedrigten OC-Werten führen (Corlett und Care, 1988; Scott et al., 1994; Scott et al., 1997). Auf der Alp nahm die Phosphorversorgung mit Fortschreiten der Vegetationsstadien ab (Kirchgeßner, 2004), dieses stellt somit eine mögliche Erklärung für den Abfall der OC-Werte dar.

Ausreichend Vitamin D, welches die OC-Bildung kontrolliert, sollte bei beiden Spezies vorhanden gewesen sein (Power und Fottrell, 1991). Allerdings hatten die Schafe nur einen erhöhten 25-OH-Vit D Wert, der 1.25(OH)<sub>2</sub>-Vitamin D Wert war dagegen gleich. Fortune et al., 1989 stellten aber gerade bei Erhöhung des 1.25 Vit D einen Anstieg der OC-Konzentration bei Schafen fest. Es ist unbekannt, wie gross der Einfluss von Vitamin D auf den OC-Spiegel wirklich ist. Gerade bei diesem Versuch muss davon ausgegangen werden, dass hier andere Faktoren den OC-Wert weit stärker beeinflusst haben und der Vitamin D Gehalt eher irrelevant für den Verlauf der OC-Serumwerte war. Vor allem bei den Ziegen mit stark steigenden 1.25 Vit D Werten scheint dieses der Fall zu sein.

Der Knochenaufbaumarker bAP unterlag im Verlauf der Alpfung mehreren Schwankungen. Bei den Schafen verhielten sich die Werte erwartungsgemäss ähnlich zu den Werten des anderen Knochenaufbaumarkers OC. Der anfängliche Anstieg kann auch hier ein Folge der vermehrten Bewegung und einem damit verbundenen gesteigerten Knochenaufbau sein. Der Anstieg war allerdings nicht signifikant wie bei Hüttenmoser (2007). Allerdings fand die Studie von Hüttenmoser an Jungtieren statt, es ist bekannt, dass hier Veränderungen am Knochen durch Bewegung ausgeprägter sind als bei älteren Tieren (Notomi et al., 2002). Bei den Ziegen kam es wie bei OC zu einem anfänglichen Sinken der Werte, danach zu einem Anstieg, dieser war allerdings interessanterweise nicht im OC sichtbar. Nicht nur Knochenaufbau, sondern auch ein Phosphormangel kann zu einem Anstieg der bAP-Aktivität führen (Scott et al., 1997). Da vor allem die Ziegen geringe P-Werte im Blut hatten, könnte dieses eine mögliche Ursache für den Anstieg der bAP-Werte gewesen sein. Ein massgeblicher Einfluss von Phosphor, könnte somit auch den unterschiedlichen Verlauf der beiden Aufbaumarker erklären.

Aufgrund des Anstiegs von den Serumwerten des Knochenresorptionsmarkers CTX wird vermutet, dass es bei Schaf und Ziege am Anfang der Alpsaison vermutlich durch die ungewohnte gesteigerte Bewegung zu einem gesteigerten Knochenabbau kam. Bereits nach einem Monat scheinen sich die Tiere an die Aktivität gewöhnt zu haben, da die Werte recht konstant blieben. Geringere Bewegung, sichtbar an den Talwerten, scheint zu



einer verminderten Knochenresorption zu führen. Dieses wurde auch in einer Studie von Hüttenmoser (2007) gezeigt, dort haben auf der Alp gehaltene Schafe signifikant höhere CTX-Werte als eine sich vermutlich weniger bewegendes Vergleichsgruppe auf der flachen Talweide. Bei Fohlen soll das Gewicht negativ mit CTX korrelieren (Donabédian et al., 2008). Auch in dieser Studie wäre ein Einfluss des Körpergewichtes denkbar, da sich der CTX-Wert gegensätzlich zum Gewicht der Tiere verhielt. Guillemant et al., 2003 stellten fest, dass eine orale Ca-Aufnahme zu einem Sinken der Serum CTX-Konzentration beim Mensch führt. Er wird als ein sehr sensibler Parameter bei Änderungen, die die orale Ca-Aufnahme betreffen, angegeben. Auf Wiederkäuer scheint dieses aber nicht zuzutreffen, da gerade bei Anstieg der CTX-Werte auch die Ca-Werte anstiegen.

Aufgrund der Berechnung des Knochenindex kann angenommen werden, dass es bei den Schafen in den ersten fünf Alpwochen sowohl zu einem sehr starken Knochenauf- wie auch –abbau kam. Insgesamt stieg die Kurve an, daher muss der Knochenaufbau dem Abbau überwogen haben. Bei den Ziegen kann davon ausgegangen werden, dass in den ersten zwei Wochen der Knochenabbau überwog. Anschliessend nahm der Knochenaufbau wie auch bei den Schafen wieder überhand. Anhand der einzelnen Werte wird vermutet, dass im Falle der Ziegen eher eine verminderte Abbaurate, bei den Schafen dagegen vermutlich eine gesteigerte Aufbaurate, zum Überwiegen des Knochenaufbaus geführt hat. Zwischen den beiden Tierarten scheint es also Unterschiede im Knochenstoffwechsel zu geben.

Nach Alfabfahrt überwog bei beiden Tieren die Knochenaufbaurate, vermutlich ist dieses auf die reduzierte Bewegung zurückzuführen. Letztlich wird anhand des Knochenindex und der Knochenmarker sichtbar, dass es bei beiden Tierarten zu einem Knochenumbau kam. Eine Korrelation zwischen OC und CTX mit der Knochendichte besteht allerdings nicht (Puustjärvi et al., 1995). Aus Veränderungen an den Knochenmarkern, die den Umbau am Knochen sichtbar machen, dürfen auch keine Rückschlüsse über die Knochenmasse und Dichte gezogen werden (Gasser, 2001).

#### **6.2.2.4. Knorpelmarker (CP-II und CTX-II) und Knorpelindex (CP-II / CTX-II)**

Es sind vor allem Schäden am Knorpel, die zu einem Anstieg von Knorpelmarkern im Blut führen (Huebner et al., 2006). Auch während des Wachstums und mit dem Alter ändert sich die Konzentration der Knorpelmarker im Blut (Billinghurst et al., 2003; Donabédian et al., 2008). Die Tiere dieser Studie waren grösstenteils ausgewachsen und wiesen auch keine bekannten Knorpelschäden auf, daher können diese Einflüsse in dieser Studie vernachlässigt werden.

Vielmehr sollte untersucht werden, ob es durch vermehrte Bewegungsaktivität und damit gesteigerter Belastung am Gelenkknorpel zu einem verstärkten Knorpelumbau kommt. Ob sich die Marker auch bei physiologischen Mehrbelastungen am Knorpel, die allein durch moderate Bewegung auf der Alpweide entstehen, verändern, ist beim Wiederkäuer unklar. Bisher gibt es keine vergleichbaren Studien dieser Art, sondern nur solche, wo der Knorpel experimentell geschädigt wurde (Giezendanner, 2009; Lu et al., 2006). Die Werte sind daher nicht vergleichbar. Bei CTX-II kam es bei den Laboranalysen zu grossen Abweichungen der Messwerte, die an der Aussagekraft der Ergebnisse stark zweifeln lassen. Es stellt sich daher die Frage, in wieweit das verwendete Testkit und die Methodik für kleine Wiederkäuer überhaupt funktionieren. Eventuell hätten besser andere Marker, mit denen es bereits mehr Erfahrungswerte im Bezug auf Bewegung gab, verwendet werden sollen. COMP (cartilage oligomeric matrix protein) wäre beispielsweise ein solcher Marker, der schon in verschiedenen Bewegungsversuchen erfolgreich eingesetzt wurde (Helal et al., 2007; Kersting et al., 2005).

In der einzigen Studie, die Knorpel auf Bewegungsaktivität bei Schafen untersuchte, wurden leider keine Knorpelmarker gemessen (Radin et al., 1982). Andere Studien nutzten primär histologische Untersuchungen (Simon, 1978; Radin et al., 1982; Kiviranta et al., 1988; Arokoski et al., 1993; Murray et al., 1999a, 1999b; Nugent et al., 2004; Firth, 2006). Moderate Bewegung, wozu die Bewegung auf der Alp sicher gezählt werden kann, führt, je nach Studie, zu keinen oder positiven Veränderungen (beispielsweise eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften) am Knorpel (Kiviranta et al., 1988; Newton et al., 1997; Arokoski et al., 2000; Billingham et al., 2003; Nugent et al., 2004; Firth, 2006). Wie sich diese positiven Veränderungen in den verschiedenen Knorpelmarkern genau widerspiegeln würden, blieb in obigen Studien leider unklar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, denn gerade bei der praktischen Anwendung in der Tiermedizin hätten Knorpelmarker als weniger invasive Diagnostikmethode eine vielversprechende Zukunft, da eine Schädigung des Knorpels bei Therapie und Vorsorge nicht erwünscht ist. Allein durch Messung von Knorpelmarkern kann bisher leider keine Aussage über eventuelle Struktur- und Konsistenzveränderungen des Knorpels gemacht werden.

Obwohl es bei beiden Tierarten zu signifikanten Änderungen der Knorpelmarker kam, ist es schwer diese Werte zu interpretieren. Am übersichtlichsten sind die Werte wohl im Knorpelindex zusammengefasst. Nach einer ersten intensiven Umbauphase hielt sich Knorpelauf- und -abbau etwa die Waage. Letztlich kann also davon ausgegangen werden, dass es auf der Alp zu einem gesteigerten Umbau am Knorpel kam. Wider Erwarten konnte dabei kein Zusammenhang mit den Bewegungsdaten festgestellt werden.

Trotzdem wird, da andere Studien Veränderungen am Knorpel durch Bewegung nachwiesen, auch hier vermutet, dass die vermehrte Bewegung einen gewissen Einfluss hatte, auch wenn dieser nicht klar ersichtlich ist. Aufgrund einer fehlenden unbewegten Vergleichsgruppe und der Unsicherheit der Testmethodik sollte dieses aber durch weitere Forschung abgeklärt werden.

## **6.3. Energiestoffwechsel**

### **6.3.1. Gewichtsentwicklung**

Die Gewichtsabnahme zu Beginn der Alpsaison bestätigt Studien von Bianca und Hays (1977), Berry et al. (2001) und Leiber et al. (2004; 2006). Sie kann mit einer Zunahme der Bewegungsaktivität, durch Transportstress und/ oder durch die Futterumstellung begründet werden (Zemp 1989a; Kreuzer et al., 1998). Im Gegensatz zum Haltungssystem im Tal, hatten die Tiere auf der Alp ein Vielfaches an Bewegung, was zu einem energetischen Mehrbedarf von bis zu 100% führen kann (Shinde und Karim, 2007). Dieses könnte die anfänglichen Gewichtsverluste vor allem bei den sehr aktiven Schafen erklären.

Leiber et al. (2006) sieht dagegen in der speziellen „alpinen Diät“ einen Hauptfaktor für die schlechtere Leistung der Tiere. Schon allein die Fütterung von alpinem Grünfutter ohne zusätzliche Bewegungsaktivität kann zu Körpermassenverlusten führen. Diese sind bei Bewegung noch ausgeprägter (Leiber et al., 2004). Dazu kommt, dass die Tiere anfangs noch nicht wussten, wohin sie für welches Futter ziehen müssen. Ein weiterer Faktor, der zu diesem Gewichtsverlust geführt haben könnte, mag die Aufnahme von stark rohfaserhaltigem Futter gewesen sein. Ein hoher Rohfasergehalt vermindert die Verdaulichkeit aller anderen Nährstoffe (Kirchgeßner, 2004).

Auch die Möglichkeit einer anfänglichen durch die Höhe verursachten Hypoxie, die zu einer reduzierten (Futtermittel-) Aktivität führen kann, muss in Betracht gezogen werden (Bianca und Kunz 1977; Leiber et al., 2006). Dagegen spricht, dass die Schafe gerade in der ersten GPS-Messperiode die durchschnittlich weitesten Strecken bewältigten. Daher kann bei dieser Tierart kaum von verminderter Bewegung durch hypoxische Effekte gesprochen werden. Falls es diese gegeben haben sollte, hätten sich die Schafe innert zwei Wochen bis zu den ersten GPS-Messungen gut adaptiert. Letztlich fanden die Versuche von Bianca und Kunz (1977) auch in einer Klimakammer statt, in welcher eine Höhe von 4000 m ü.M. simuliert wurde. Dies ist wesentlich höher als das auf 2000 m ü.M. angesiedelte Versuchsgebiet, und daher auch mit einem sehr viel geringeren Sauerstoffpartialdruck verbunden.

Die Ziegen dagegen schienen sich nicht so schnell anzupassen und nahmen stärker an Gewicht ab als die Schafe. Begründet werden könnte dieses damit, dass die Schafe im Gegensatz zu den Ziegen schon im vorherigen Sommer auf der Alp waren, und so bereits wussten, wo sich ergiebige Futterplätze befanden. Auch die extremen Klimabedingungen die zu einem höheren Energiebedarf führen, machten den Ziegen mehr zu schaffen. Slee (1971) stellte fest, dass die Futteraufnahme bei kalten Bedingungen um 12% - 50% abnimmt. Leiber et al. (2006) bemerkten im Gegensatz zum Tal höhere Windgeschwindigkeiten auf der Alp, die zu einer zusätzlichen Auskühlung der Tiere führen. Die Schafe hatten in all diesen Punkten mit ihrem besser isolierendem Vlies einen klaren Vorteil. Welches nun die Hauptursache für den anfänglichen Gewichtsverlust war, bleibt unklar. Auch eine additive Wirkung verschiedener Faktoren ist vorstellbar.

Nach einer Adaptionszeit von vier Wochen schienen sich beide Tierarten erfolgreich an ihre neue Umgebung, das neue Futter und die vermehrte Bewegung gewöhnt zu haben und sie legten kontinuierlich an Gewicht zu. Erst gegen Ende des Alpaufenthaltes kam es zu einer erneuten Gewichtsabnahme. Gründe hierfür könnten im Fortschreiten der Vegetationsstadien oder am schlechteren Wetter (Frost, Schneefall, starker Regen) liegen. Ein hoher Fasergehalt und eine niedrige Verdaulichkeit sind Folgen einer kurzen Vegetationszeit, in der die Pflanzen schneller reifen (Brühlmann und Thomet, 1991). Alpgras hat im Spätsommer einen relativ hohen Rohfasergehalt, das Futter ist so schlechter vom Tier verwertbar. Ein höherer Rohfasergehalt kann zusätzlich zu einer Verminderung der Futteraufnahme führen (Bianca und Hays, 1977). Auch Leiber et al. (2006) stellten auf der Alp mit zunehmenden Vegetationsstadien eine Abnahme des Energiegehaltes fest. Zusätzlich wurde beobachtet, dass die letzten drei Tage vor dieser Messung sehr schlechtes Wetter mit Schneefall die Tiere beim Fressen behinderte.

Das Wiegen der Tiere in Woche 12 erfolgte erst nach Rücktransport ins Tal. Einerseits war dies im Vergleich zu den vorherigen Messungen wesentlich später am Tag, ausserdem hatten die Tiere während des Transportes bereits viel Kot und Urin ausgeschieden. Knowles (1998) stellte bei Transporten eine rapide Abnahme der Flüssigkeit im Pansen fest, sobald die Tiere nicht mehr gefüttert wurden. Dies wiederum führt zu einer Abnahme des Lebendgewichtes. Die Mägen und deren Inhalt können bis zu 20% des Körpergewichtes ausmachen (Baile und Forbes, 1974). Verluste, die durch Transport entstehen, sind sogar ausgeprägter als alleiniges Hungern der Tiere. Zwar betrug die Transportzeit insgesamt nur etwa sechs Stunden, die Gewichtsverluste sind aber in den ersten 12 h des Transportes am grössten (Knowles, 1998).

Im Tal nahmen die Tiere dann wieder zu, vermutlich da sie weniger Bewegung hatten und mehr Kraftfutter erhielten.



### 6.3.2. Parameter des Energiestoffwechsels im Blut (Glucose, Lactat, BHB, Urea)

Die Analysen der erhobenen Energieparameter im Blut weisen auf eine positive Energiebilanz der Tiere hin.

Beispielsweise korreliert der Glucose-Wert, bei dem alle Werte sich stets im Referenzbereich (2.3- 3.6 mmol/l; Tschuor et al. 2008) befanden, positiv mit der Energiebalance (Reist et al., 2002). Coulon und Pradel (1997) stellten eine durch Gehaktivität verursachte Erhöhung des Glucosespiegels bei Kühen fest, auch Judson et al. (1976) bemerkten eine gesteigerte Gluconeogenese unter Bewegung. Pethick et al., (1987) sahen in Glucose die Hauptenergiequelle bei Schafen, die auf einem Laufband bewegt wurden. Nach Leiber et al. (2005a) sollten diese Anstiege auf der Alp erheblich ausgeprägter sein. Vor allem die Werte der Schafe widersprachen all diesen Studien. So kam es bei den weitesten zurückgelegten Strecken zu einer Abnahme der Glucosewerte.

Thompson et al. (1978) stellten eine Erhöhung des Glucosespiegels bei Kälte fest. Zu Beginn der Alpengang zeigten die Ziegen oft Kältezittern, welches den anfänglichen Anstieg der Glucose-Werte erklären kann. Die anschliessende Abnahme könnte mit einer ersten Gewöhnung an die vermehrte Bewegung oder die Temperatur begründet werden. Dass Tiere auf der Alp durchgängig tiefere Glucosekonzentration im Serum haben (Zemp et al. 1989b; Berry et al., 2001; Leiber et al., 2004), konnte nicht bestätigt werden. Wie auch bei Kreuzer et al. (1998) konnten hier keine unterschiedlichen Werte zwischen Tal und Höhe festgestellt werden. Letztlich muss berücksichtigt werden, dass der Glucosespiegel stark stressabhängig ist (Knowles, 1998). Trotz relativ gleicher Blutentnahmebedingungen, kann es sein, dass einzelne Entnahmen für einzelne Tiergruppen mit vermehrtem Stress verbunden waren und es somit zu „Ausreisser-Werten“ kam.

Zu einem Lactatanstieg kommt es, wenn die Tiere in eine anaerobe Stoffwechselsituation geraten. Anscheinend hat selbst die vermehrte Bewegung auf der Alp, obwohl die Tiere es nicht gewohnt waren, zu keiner solchen anaeroben Situation am Muskel geführt, da der Lactatspiegel mehr oder weniger unverändert blieb. Dies ist allerdings nicht sehr verwunderlich, da die Tiere frei bestimmen konnten, wie viel sie sich bewegten. Aus der Humanmedizin ist bekannt, dass bei sogenanntem Höhenttraining die Lactatkonzentration im Serum deutlich gesteigert ist (Neumann, 2009). Hypoxische Bedingungen können bei Aktivität schneller dazu führen, dass der Körper in eine Sauerstoffmangelsituation gelangt. Da die Werte der Schafe und Ziegen sich auf der Alp nicht signifikant zu den Werten vom Tal unterschieden, kann gefolgert werden, dass die Tiere effektiv ihre Aktivität der individuellen Sauerstoffsättigung angepasst haben.

Widersprüchlich zu Ergebnissen dieser Studie stellten Leiber et al. (2004) bei gealpten Kühen höhere BHB-Werte als bei Vergleichsgruppen im Tal fest. Auch eine Studie von

Kreuzer et al. (1998) an Rindern zeigte einen sofortigen Anstieg der BHB-Werte nach erfolgtem Transport auf die Alp, die sich erst nach etwa drei Wochen wieder normalisierten. Es ist unklar, warum in dieser Studie dagegen die Werte anfänglich fallen und stets niedriger bleiben als im Tal. Kleine Wiederkäuer scheinen hier eventuell über andere Anpassungsmechanismen zu verfügen. Vielleicht wird beim kleinen Wiederkäuer das mobilisierte BHB schneller von der Muskulatur als Energiequelle genutzt und konnte daher im Blut nicht gemessen werden. Auch ist davon auszugehen, dass die Schafe und Ziegen sich mehr bewegten als gealpte Rinder. Da Muskeln BHB als Energiequelle nutzen, könnte ein sofortiger Verbrauch die niedrigen Werte erklären.

Wie BHB gehören auch die NEFA zu den Stoffwechselprodukten des Fettabbaus und sollten daher ähnlich zu BHB reagieren. Widersprüchlich zur vorliegenden Studie notierten Coulon und Pradel (1997) und Leiber et al. (2005a) eine Erhöhung der NEFA durch Bewegungsaktivität bei Kühen. Adewuyi et al. (2006) stellten dagegen bei Kühen eine negative Korrelation zwischen Gehaktivität und dem NEFA-Serumwert fest. Neben diesen Studien an Rindern gab es nur eine Untersuchung an Schafen (Pethick et al., 1987). Hier wurden die Tiere zwei Stunden täglich auf einem Laufband bei 4.5 km/h bewegt. In diesem Zeitraum stiegen die Ketonkörper nur sehr leicht an, während es vor allem zu einer Glycogenolyse mit einem Anstieg von Glucose im Blut kam. Es wurde gefolgert, dass die NEFA keine entscheidende Energiequelle in der Bewegung darstellen, da zuerst die leichter zugänglichen Glycogenspeicher genutzt werde. Letztlich steht diese Studie in keinem Widerspruch zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie. Zwar gibt es keinen Abfall der Ketonkörper, der Anstieg war allerdings auch nicht signifikant. Ausserdem sind die Tiere in diesem Experiment viel weitere Strecken in viel kürzerer Zeit gelaufen. Die Bewegung war demnach viel intensiver und ist daher auch schwerer vergleichbar mit einer über 12 h verteilten Weideaktivität mit diversen Ruhepausen bei geringerer Grundgeschwindigkeit.

Die vorliegende Studie bestätigt vielmehr die Thesen von Adewuyi et al. (2006) und Kreuzer et al. (1998), dass Bewegung durch Weideaktivität zu einer Reduktion der Ketonkörper führt. Die BHB-Werte lassen vermuten, dass sich Schafe und Ziegen besser und vor allem schneller an alpine Bedingungen anpassen können als Rinder. Letztlich muss bei allen Vergleichen der verschiedenen Stoffwechselparameter beachtet werden, dass viele Versuche an laktierenden Kühen durchgeführt wurden, die ohnehin einen höheren Energiebedarf haben.

Ein Anstieg von Harnstoff im Serum kann durch absoluten oder relativen Proteinüberschuss entstehen. In Rp-Mangelsituationen kann es zum Abbau des körpereigenen Proteins kommen, dies würde sich ebenfalls kurzfristig als Anstieg des

Urea-Wertes im Serum darstellen. Wie in einer Studie an Rindern (Kreuzer et al., 1998) blieben die Urea Werte von den Schafen bis auf einen signifikanten Abfall von Woche 5 auf 7 relativ konstant. Da während der gesamten Alp die Proteinversorgung gesichert war (siehe 6.3.4.), kann es sich hierbei nur um einen kurzfristigen Energiemehrbedarf gehandelt haben, auch wenn es zu keiner Änderung der Bewegungsaktivität kam. Auch die Schwankungen der Harnstoffwerte bei den Ziegen lassen sich weder auf geänderte Bewegungsaktivität noch auf eine veränderte Nahrungsaufnahme zurückführen.

Die Werte der Probenentnahme in Woche 12 weichen auffallend oft von den Werten der anderen Blutprobenentnahmen ab. Diese Blutentnahme fand, wie auch das Wiegen der Tiere, direkt nach dem Rücktransport von der Alp statt. Transport, Verladen und Entladen bedeuten physischen, physiologischen und psychologischen Stress für die Tiere (Knowles, 1998). Hauptstressoren sind dabei Bewegung, Geräusche, Vibration und Platzmangel (Kreuzer et al. 1998). Auch wenn die Tiere nur verhältnismässig kurz (6 h) transportiert wurden, kann davon ausgegangen werden, dass dies einige Blutwerte beeinflusst hat, da vor allem die ersten Stunden des Transportes als besonders stressig gelten. Eine volle Erholung der Tiere nach einem 14-stündigen Transport kann bis zu 144 h dauern (Knowles, 1998).

So kommt es besonders in den ersten Transportstunden zu einem rasanten Anstieg von Glucose im Serum, welcher sich erst nach neun Stunden wieder normalisiert (Knowles, 1998). Kreuzer et al. (1998) beschreiben bei Rindern einen Lactatanstieg während des Transportes. Obwohl beide Tierarten im selben Fahrzeug zur gleichen Zeit transportiert wurden, kam es hier nur bei den Ziegen zu einem Anstieg des Wertes. Auch Angstsituationen, wo die Tiere Muskelzittern zeigen, können zu einem Anstieg der Lactatwerte führen. Der tierartliche Unterschied könnte eventuell auf einer geringeren Stressanfälligkeit der Schafe beruhen. Lactat als physischer Stressparameter kann neben dem Muskelzittern auch durch Prellungen, die leichte Muskelschädigungen hervorrufen, während der Fahrt ansteigen. Vielleicht stellte das zu diesem Zeitpunkt sehr dicke Vlies der Schafe einen effektiven „Stossdämpfer“ gegen mögliche physikalische Schäden dar, während die vergleichsweise „knochigen“ Ziegen und auch Rinder aus obiger Studie jeden Stoss mehr oder minder ungepolstert abbekamen. Auch der extreme Anstieg der BHB-Werte in Woche 12 kann als eine Transportfolge gehandelt werden. Sowohl der Futterentzug als auch die Energie, die die Tiere benötigen, um die Bewegungen des Anhängers auszubalancieren, kann eine Fettmobilisation erfordern, die sich in einem Anstieg von BHB widerspiegelt (Knowles, 1998; Kreuzer et al., 1998). Einzig der Abfall des Urea-Wertes der Ziegen kann in diesem Zusammenhang nicht erklärt werden. Laut

Knowles (1998) sollte der Urea-Wert nämlich bei Nahrungsentzug oder Transport ansteigen.

### 6.3.3. Energie: Bedarf und Deckung

Ohne die Verdaulichkeit bestimmt zu haben, kann beim Wiederkäuer keine genaue Aussage über den metabolischen Energiewert der Futtermittel getroffen werden. Durch die Besonderheit, dass die Verdauung über die Mikroorganismen im Pansen läuft, können allein anhand der analysierten BE-Angaben aus Pflanzenproben und Kot keine konkreten Rückschlüsse über die aufgenommene ME gemacht werden. So enthält z.B. Lignin viel Bruttoenergie, diese kann aber zu einem grösseren Teil nicht von den Mikroorganismen aufgeschlossen und somit vom Wiederkäuer verwendet werden. Zwar hatten Ziegenfutter und Kot einen höheren BE-Gehalt, der Anteil an Faserfraktionen war aber auch grösser als der des Schaffutters. Welches Futter nun energetisch wertvoller war, lässt sich also allein anhand dieser Werte nicht sagen.

Letztlich wurde ein deutlich höherer Energieverbrauch durch vermehrte Bewegung, hypoxische Bedingungen und belastenderes Klima auf der Alp vorausgesetzt. Lachica et al. (1997) stellten folgende Gleichung für die Bewegung von kleinen Wiederkäuern auf geneigten Strecken auf:  $EC_w = 3.39e^{0.063SI}$ ;  $r=0.996$

Wobei:  $EC_w$  = energy cost of walking (J/kg Lebendgewicht/ m); SI = slope (Neigung; %).

Aufgrund dieser Gleichung errechnet sich für die Schafe ein energetischer Bedarf für das Laufen von 1.36 MJ und für die Ziegen von 1.02 MJ Nettoenergie. Aufgrund des Bruttoenergiegehaltes von 18.8 und 20.3 MJ/kg TS und der anhand der natürlichen Alkane geschätzten Verdaulichkeit von 75% bei den Schafen und 72% bei den Ziegen, wurde ein Gehalt an verdaulicher Energie von 14.1. und 14.6 MJ/ kg TS für das von der jeweiligen Spezies gefressene Futter geschätzt. Demnach schienen die Tiere gut in der Lage zu sein, ihren Energieaufwand durch entsprechendes Weideverhalten und gezielte Futteraufnahme auszugleichen. Auch der positive Gewichtsverlauf und die untersuchten Energieparameter im Blut (6.3.2.) deuten auf keine Energiemangelsituation der Tiere auf der Alp hin. Dies bestätigt eine Studie von Spatz (1994). Es wird davon ausgegangen, dass eine Vegetation mit einem Futterwert von 2, wie er auf der Crap Alv zu finden ist (Keller, 2006), für die Ernährung und leichte Aktivität der Tiere ausreicht.

Im tierartlichen Vergleich schneiden gerade zu Anfang der Alp die Schafe im Bezug auf den Energiehaushalt etwas besser ab als die Ziegen. Aufgrund der anfänglichen stärkeren Gewichtsabnahme bei den Ziegen wird vermutet, dass die Ziegen sich nicht so gut und so schnell anpassen konnten wie die Schafe.



Eventuell handelt es sich hier aber auch um eine Rassenproblematik, und eine andere Ziegenrasse hätte vielleicht weniger Schwierigkeiten unter alpinen Bedingungen gehabt. Bianca und Kunz (1978) beschrieben, dass Saanenziegen im Vergleich zu anderen Ziegenrassen deutlich kälteanfälliger sein. Auch Gall (2001) stellte fest, dass sich Saanenziegen im Vergleich zu anderen Rassen, nicht so gut an hohe Temperaturen oder eine Futterreduktion anpassen können; Körpermassenverluste waren bei den Saanenziegen stets höher. Im Bezug auf die Verdaulichkeit unter extremen Bedingungen scheiden die Saanen ebenfalls schlechter ab. Untersuchungen in einer Höhenkammer zeigten dagegen keine eindeutigen Rassenunterschiede (Bianca und Kunz, 1978). Es wäre interessant zu sehen, ob andere Ziegenrassen weniger Probleme gehabt hätten und sich eventuell sogar genauso gut, wenn nicht sogar besser als die Schafe, angepasst hätten.

Egal um welche Tierart es sich handelt, die Energiekosten für eine bestimmte Weideregion werden am besten vor Ort errechnet, da verschiedene Umweltbedingungen zu einem unterschiedlichen Energiebedarf führen (Lachica et al., 1997; 1999). Oftmals weichen theoretische Berechnungen ohne Berücksichtigung der individuellen Umstände einer Weideregion nämlich gravierend von der Realität ab (Lachica et al., 1997; 1999). Aus diesem Grund können die Ergebnisse dieser Studie auch nicht für andere Alpweiden pauschalisiert werden.

#### **6.3.4. Protein: Bedarf und Deckung**

Die gesammelten Pflanzenproben entsprachen während der gesamten Alpfung einer dem proteinbedarf entsprechenden Portion, wenn ein Rohproteinbedarf von  $4 \text{ g/kg}^{0.75}$  zugrunde gelegt wird. Der Proteinbedarf wurde sogar weit überschritten. So hatten die Ziegen beispielsweise in Woche 2 durchschnittlich ein metabolisches Körpergewicht von 22.31 kg. Nach Rahmann (2000) kann eine Ziege dieser Gewichtsklasse max. 2.5 kg TS am Tag fressen. Eine Pflanzenmenge dieser Größenordnung würde 261 g Rohprotein enthalten. Der Erhaltungsbedarf an Rohprotein ( $4 \text{ g/kg}^{0.75}$  nach Jeroch et al. 1999; Kirchgeßner, 2004) liegt aber in dieser Gewichtsklasse nur bei 89 g. Selbst wenn von einer 75% Erhöhung aufgrund berg-bedingter erschwelter Bewegung ausgegangen würde, ergäbe dieses einen Bedarf von 156 g Rp, der auch immer noch gut gedeckt wäre. Letztlich müssten die Tiere für diesen um 75% erhöhten Proteinbedarf noch nicht mal die maximale TS Menge zu sich nehmen. Auch Ramirez et al. (1991) stellten bei freilebenden Ziegen in Mexico fest, dass die Tiere mit dem vorhandenen „Browse“ genügend Protein bekommen. Auch bei den Schafen dürfte im gesamten Untersuchungszeitraum der angegebene Erhaltungsbedarf gedeckt gewesen sein. Beispielsweise betrug das metabolische

Körpergewicht in Woche 6 durchschnittlich 22.93 kg. Nach Rahmann können die Tiere in dieser Gewichtsklasse also 2.61 kg TS am Tag aufnehmen. Nach den Analysewerten der gesammelten Proben hätte ein Schaf also 339.56 g Rp aufnehmen können. Dieses würde wiederum bei weitem den täglichen Erhaltungsbedarf ( $4 \text{ g/kg}^{0.75}$ ) von 91.72 g Rp und auch einen Mehrbedarf von 75 % ( $6 \text{ g/kg}^{0.75}$ ) mit 137.58 g Rp decken (Jeroch et al. 1999; Kirchgeßner, 2004; Shinde und Karim, 2007). Letztlich ist aber bei beiden Tierarten unbekannt, wie viel sie wirklich gefressen haben, und ob es wirklich zu einem Überschuss an Protein oder Energie gekommen ist. So ist beispielsweise kein Proteinüberschuss in den Urea-Werten sichtbar.

Berry et al. (2001) stellten bei Kühen fest, dass Tiere, die extra Protein zugefüttert bekamen, weniger ausgeprägte Körpermassenverluste auf der Alp zeigten. So hatten die hohen Proteinaufnahmen, wenn von einer Deckung des Energiebedarfs ausgegangen wird, vielleicht sogar einen positiven Effekt auf den Verlauf des Körpergewichts. Auch stellten Berry et al. (2001) fest, dass die Adaption an die Höhe im Bezug auf die Körpermasse besser war, sobald die Tiere mehr Energie in ihrer Ration erhielten. Die anfänglich schlechtere Adaption der Ziegen kann daher eventuell auf weniger energiereiches Futter zurückgeführt werden.

Auffallend ist jedoch, dass in anderen Studien ein höherer Proteingehalt in „Browse“ als in „Graze“ festgestellt wurde (Clauss et al., 2008). Demnach wurden bei den Schafen in Pflanzen und Kotproben niedrigere Rp- und N-Anteile als bei dem „Browserfutter“ der Ziegen erwartet. Genau das Gegenteil war der Fall. Wenn davon ausgegangen wird, dass beide Tierarten ihrem Bedarf entsprechend Futter aufgenommen haben, stimmen die Ergebnisse dieser Studie nicht mit Pfister und Malechek (1986) überein, wo gezeigt wurde, dass Ziegen Futter mit mehr Rp wählen als Schafe. Dagegen würden sie die Studie von Isac et al. (1994) bestätigen, wonach die N-Aufnahme bei Ziegen geringer ist als beim Schaf. Auch Kronberg und Malechek (1997) konnten zeigen, dass Schafe sich eine rohproteinhaltigere Diät aussuchen als Ziegen. Diese wiederum sollte streng mit Gewichtsveränderungen von Schaf und höchstwahrscheinlich auch von Ziegen korrelieren, welches hier allerdings nicht bestätigt werden konnte.

## 6.4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Schafe und Ziegen zeigen ihren Fresstypen entsprechendes Weide- und Bewegungsverhalten auf der Alp. Beide Tierarten besetzen hierbei unterschiedliche ökologische Nischen und beeinflussen dabei die alpine Flora. Inwieweit diese Beweidung positive oder negative Folgen für das ökologische System der Alpen hat, muss weiter erforscht werden. Es wurde festgestellt, dass trotz der verschiedenen Fresstypen nicht eindeutig vorausgesagt werden kann, welche Gebiete die Tiere aufsuchen werden und wie weit die Tiere wandern. Insbesondere das Verhalten der Ziegen scheint nicht nur durch die Vegetation, sondern auch durch andere Faktoren wie Klima, Erfahrungen und Domestikation beeinflusst zu werden.

Die Bewegung auf der Alp beeinflusst die Knochenstruktur positiv, indem sie die Stabilität des Knochens erhöht. Teilweise bleiben diese positiven Effekte bis acht Wochen nach der letzten intensiven Bewegungseinheit bestehen. Bewegung scheint den Knochen an unterschiedlichen Stellen verschieden zu beeinflussen. So kommt es an der Diaphyse in diesem Versuch zu einer Zunahme des kortikalen Durchmessers, während an der Epiphyse zusätzlich auch der gesamte Knochendurchmesser zunimmt. An den einzelnen gemessenen Knochenanteilen kommt es dabei innerhalb der Alpung nur beim Schaf zu einer signifikanten Änderungen der totalen Knochendichte (vBMD). Die verschiedenen Knochen- und Knorpelmarker zeigen dabei den Umbau der Gewebe an. Damit diese Marker auch irgendwann in der Diagnostik der Tiermedizin eingesetzt werden können, besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Genauigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen. Auch im Bezug auf die Knochenstruktur fehlen Studien mit unbewegten Vergleichsgruppen, auch wären Messungen an unterschiedlichen Knochen und an weiteren Knochenpunkten interessant.

Eine Alpung von Schaf und Ziege scheint im Bezug auf den Energiehaushalt gesehen nach einer gewissen Adaption zu keinen Defiziten zu führen. Diese Studie zeigt, dass die Tiere im Sommer sowohl ihren Energie- als auch Proteinbedarf ausreichend mit der vorhandenen alpinen Flora decken können. Insgesamt scheinen sich Ostfriesische Milchschafe dabei schneller anpassen zu können als Saanenziegen. Spannend wären weitere Studien mit anderen Rassen, unbewegten Vergleichsgruppen oder laktierenden Tieren.

## 7. Literaturverzeichnis

- Adewuyi A.A., Roelofs J.B., Gruys E., Toussaint M.J.M., van Eerdenburg F.C.J.M. (2006): Relationship of Plasma Nonesterified Fatty Acids and Walking Activity in Postpartum Dairy Cows. *J. Dairy Sci.*; 89: 2977-2979
- Aguilera J.F., Lachica M., Prieto C. (1991): Energy Cost of Locomotion in Granadina Goats. In: *Energy Metabolism of Farm Animals. Proc. 12th Symp.*, Kartause Ittingen, Schweiz, EAAP Publication No.58: 425-428
- Alippi R.M., Meta M.D., Olivera M.I., Bozzini C., Schneider P., Meta I.F., Bozzini C.E. (2002): Effect of protein-energy malnutrition in early life on the dimensions and bone quality of the adult rat mandible. *Arch. Oral. Biol.*; 47:47-53
- Ameye L.G., Deberg M., Oliveira M., Labasse A., Aeschlimann J.M., Henrotin Y. (2007): The Chemical Biomarkers C2C, Coll2-1, and Coll2-1NO2 Provide Complementary Information on Type II Collagen Catabolism in Healthy and Osteoarthritic Mice. *Arthritis Rheum.*; 56: 3336-3346
- Andrighetto I., Cozzi G., Berzaghi P., Zancan M. (1993): Avoidance of degradation of alpine pasture through grazing management: investigations of change in vegetation nutrition characteristics as a consequence of sheep grazing at different periods of the growing season. *Land Degrad. Rehabil.*; 4: 37-43
- Arokoski J., Kiviranta I., Jurvelin J., Tammi M., Helminen H.J. (1993): Long-distance running causes site-dependent decrease of cartilage glycosaminoglycan content in the knee joints of beagle dogs. *Arthritis Rheum.*; 36: 1451-1459
- Arokoski J.P.A., Jurvelin J.S., Vaatainen U., Helminen H.J. (2000): Normal and pathological adaptations of articular cartilage to joint loading. *Scand. J. Med. Sci. Sports*; 10: 186-198
- Association of Official Analytical Chemists (1997): Official methods of analysis. AOAC, Arlington, VA
- Bätzing, W. (2003): Die Alpen. Geschichte und Zukunft einer europäischen Kulturlandschaft. 2. Auflage. Verlag C.H. Beck, München
- Baile C.A., Forbes J.M. (1974): Control of feed intake and regulation of energy balance in ruminants. *Physiol. Rev.*; 54: 160-214
- Bajaj R., Ranaweera S.L., Agrawal D.P. (2002): GPS: Location-Tracking Technology. *Computer*; April: 92-94
- Bass S.L., Eser P., Daly R. (2005): The effect of exercise and nutrition on the mechanostat. *J. Musculoskelet. Neuronal Interact.*; 5: 239-254
- Beaupre G.S., Orr T.E., Carter D.R. (1990): An approach for time-dependent bone modeling and remodeling-theoretical development. *J. Orthop. Res.*; 8: 651-661
- Bendavid E.J., Shan J., Barrett-Connor E. (1996): Factors associated with bone mineral density in middle-aged men. *J. Bone Miner. Res.*; 11: 1185-1190
- Bennell K.L., Malcolm S.A., Khan K.M., Thomas S.A., Reid S.J., Brukner P.D., Ebeling P.R., Wark J.D. (1997): Bone mass and bone turnover in power athletes, endurance athletes, and controls: a 12-month longitudinal study. *Bone*; 20: 477-484
- Bergner H., Hoffman L. (1996): Bioenergetik und Stoffproduktion landwirtschaftlicher Nutztiere. Harwood Academic Publishers, Amsterdam



- Berry N.R., Sutter F., Bruckmaier R.M., Blum J.W., Kreuzer M. (2001b): Limitations of high Alpine grazing conditions for early-lactation cows: effects of energy and protein supplementation. *Anim. Sci.*; 73: 149-162
- Bianca W., Hays F.L. (1977): Vergleichende Untersuchungen am Rind bei Stallhaltung im Tal und auf der Alp sowie bei Weidehaltung auf der Alp. *Schweiz. Landw. Forsch.*; 16: 215-234
- Bianca W., Kunz P. (1977): Das Verhalten von Ziegen in Kälte, Hitze und Höhe. *Z. Tierzüchtgsbiol.*; 94: 276-290
- Bianca W., Kunz P. (1978): Physiological Reactions of Three Breeds of Goats to Cold, Heat and High Altitude. *Livest. Prod. Sci.*; 5: 57-69
- Bianca W., Näf F. (1978): Reaktionen von Rindern auf 4000 m simulierte Höhe in Abhängigkeit vom Alter. *Schweiz. Arch. Tierheilk.*; 120: 615-630
- Bianca W., Näf F. (1979): Responses of Cattle to the Combined Exposure, to Diurnal Temperature Rhythm (-5 to 25 °C) and to Simulated High-Altitude (4000 m). *Int. J. Biometeor.*; 23: 299-310
- Bianca W., Wegmann-Bosshardt H. (1974): Die Durchlässigkeit von Rinderhaar für ultraviolette Strahlung. *Schweiz. Arch. Tierheilk.*; 116: 141-146
- Biewener A.A., Thomason J., Goodship A., Lanyon L.E. (1983): Bone stress in the horse forelimb during locomotion at different gaits: a comparison of two experimental methods. *J. Biomech.*; 16: 565-576
- Bikle D.D., Gee E., Pillai S. (1993): Regulation of keratinocyte growth, differentiation, and vitamin D metabolism by analogs of 1.25-Dihydroxyvitamin D. *J. Invest. Dermatol.*; 101: 713-718
- Billinghurst R.C., Dahlberg L., Ionescu M., Reiner A., Bourne R., Rorabeck C., Mitchell P., Hambor J., Diekmann O., Tschesche H., Chen J., Van Wart H., Poole A.R. (1997): Enhanced Cleavage of Type II Collagen by Collagenases in Osteoarthritic Articular Cartilage. *J. Clin. Inv.*; 99:1534-1545
- Billinghurst R.C., Brama P.A.J., van Weeren P.R., Knowlton M.S., McIlwraith C.W. (2003): Significant exercise-related changes in the serum levels of two biomarkers of collagen metabolism in young horses. *Osteoarthr. Cartilage*; 11: 760–769
- Blum J.W. (2003): Calcium-und Phosphorstoffwechsel und deren Regulation. Skript für Studierende der Veterinärmedizinischen Fakultät Bern
- Blumthaler M., Ambach W., Rehwald W. (1992): Solar UV-A and UV-B Radiation Fluxes at Two Alpine Stations at Different Altitudes. *Theor. Appl. Climatol.*; 46: 39-44
- Bogner H.A., Grauvogel A., (1984): Verhalten landwirtschaftlicher Nutztiere. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart (Hohenheim)
- Bourrin S., Palle S., Pupier R., Vico L., Alexandre C. (1995): Effects of physical training on bone adaptation in three zones of the rat tibia. *J. Bone Miner. Res.*; 10: 1745–1752
- Boyne A.W., Brockway J.M., Ingram J.F., Williams K. (1981): Modification, by Tractive Loading, of the Energy Cost of Walking in Sheep, Cattle and Man. *J. Physiol.*; 315: 303-316
- Bozzini C., Alippi R.M., Leal T.L., Olivera M.I., Bozzini C.E. (1994): Additive effects of dietary protein and energy deficiencies on mandibular growth in the weanling rat. *Acta. Odontol. Latinoam.*; 8: 3-8
- Brand R.A., Siegler S., Pirani S., Morrison W.B., Udupa J.K. (2006): Cartilage anlagen adapt in response to static deformation. *Med. Hypotheses*; 66: 653–659

- Brama P.A., van den Boom R., DeGroot J., Kiers G.H., van Weeren P.R. (2004): Collagenase-1 (MMP-1) activity in equine synovial fluid: influence of age, joint pathology, exercise and repeated arthocentesis. *Equine Vet. J.*; 36: 34-40
- Braun-Blanquet J. (1948/1949): Übersicht der Pflanzengesellschaften. Rätien. Junk (Den Haag)
- Brockway J.M., Gessaman J.A. (1977): The Energy Cost of Locomotion on the Level and on Gradients for the Red Deer (*Cervus Elaphus*). *Q. J. Exp. Physiol.*; 62: 333-339
- Brosh A. (2007): Heart rate measurements as an index of energy expenditure and energy balance in ruminants: A review. *J. Anim. Sci.*; 85: 1213-1227
- Brosh A., Aharoni Y., Degen A.A., Wright D., Young B. (1998): Estimation of Energy Expenditure from Heart Rate Measurements in Cattle Maintained Under Different Conditions. *J. Anim. Sci.*; 76: 3054-3064
- Brühlmann M., Thomet P. (1991): Verlauf des quantitativen und qualitativen Futterangebotes auf Alpweiden. *Landw. Schweiz*; 4: 547-554
- Brunette M.G., Chan M., Ferriere C., Roberts K.D. (1978): Site of 1,25(OH)<sub>2</sub>vitamin D<sub>3</sub> synthesis in the kidney. *Nature*; 276: 287-289
- Budras K. D., Wünsche A. (2002): Atlas der Anatomie des Rindes: Lehrbuch für Tierärzte und Studierende. Hannover Schlüter
- Burga C.A., Klötzli F., Grabherr G. (2004): Gebirge der Erde. Landschaft, Klima, Pflanzenwelt. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart (Hohenheim)
- Calvo M.S., Eyre D.R., Gundberg C.M. (1996): Molecular basis and clinical application of biological markers of bone turnover. *Endocr. Rev.*; 17: 333-368
- Carter D.R. (1987): Mechanical loading history and skeletal biology. *J. Biomech.*; 20:1095-1109
- Chevalier X., Conrozier T. (2005): Biological markers for osteoarthritis: an update. *Joint Bone Spine*; 72: 106-109
- Christen R.E., Kunz P., Langhans W., Leuenberger H., Sutter F., Kreuzer M. (1996): Productivity, requirements and efficiency of feed and nitrogen utilization of grass-fed early lactating cows exposed to high Alpine conditions. *J. Anim. Physiol. An. N.*; 76: 22-35
- Christgau S., Rosenquist C., Alexandersen P., Bjarnason N.H., Ravn P., Fledelius C., Herling C., Qvist P., Christensen C. (1998): Clinical evaluation of the serum crosslaps one step ELISA, a new assay measuring the serum concentration of bone-derived degradation products of type I collagen C-telopeptides. *Clin. Chem.*; 44: 2290-2300
- Clapperton J.L. (1964): The energy metabolism of sheep walking on the level and on gradients. *Brit. J. Nutr.*; 18: 47-54
- Clauss M., Kaiser T., Hummel J. (2008): The Morphophysiological Adaptions of Browsing and Grazing Mammals. In: *The Ecology of Browsing and Grazing*; Gordon I.J., Prins H.H.T., Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 47-88
- Conroy B.P., Kraemer W.J., Maresh C.M., Fleck S.J., Stone M.H., Fry A.C., Miller P.D., Dalsky G.P. (1993): Bone mineral density in elite junior Olympic weightlifters. *Med. Sci. Sports Exerc.*; 25: 1103-1109
- Corlett S.C., Care A.D. (1988): The effects of reduced dietary phosphate intake on plasma osteocalcin levels in sheep. *Q. J. Exp. Physiol.*; 73: 443-445

- Cornelissen B.P., van Weeren P.R., Ederveen A.G., Barneveld A. (1999): Influence of exercise on bone mineral density of immature cortical and trabecular bone of the equine metacarpus and proximal sesamoid bone. *Equine Vet. J. Suppl.*; 31: 79-85
- Coulon J.-B., Pradel P. (1997): Effect of walking on roughage intake and milk yield and composition of Montbeliarde and Tarantaise dairy cows. *An. Zootechnie*; 46: 139-146
- Coulon J.B., Pradel P., Cochard T., Poutrel B. (1998): Effect of Extreme Walking Conditions for Dairy Cows on Milk Yield, Chemical Composition, and Somatic Cell Count. *J. Dairy Sci.*; 81: 994-1003
- Courteix D., Lespessailles E., Peres S.L., Obert P., Germain P., Benhamou C.L. (1998): Effect of physical training on bone mineral density in prepubertal girls: a comparative study between impact-loading and non-impact-loading sports. *Osteoporos. Int.*; 8: 152-158
- Daccord R., Kessler J. (1999):  
Fütterungsempfehlungen für das Schaf und die Ziege. In: Fütterungsempfehlungen und Nährwerttabellen für Wiederkäuer. Verlag LmZ, Landw. Lehrmittelzentrale, Zollikofen, CH
- da Costa M.J., da Silva R.G., de Souza R.C. (1992): Effect of air temperature and humidity on ingestive behaviour of sheep. *Int. J. Biometeorol.*; 36:218-222
- Davicco M.-J., Horcajada-Molteni M.-N., Gaumet-Meunier N., Lebecque P., Coxam V., Barlet J.-P. (1999): Endurance training and bone metabolism in middle-aged rats. *Mech. Ag. Dev.*; 109: 83-96
- Delmas P.D., Eastell R., Garnero P., Seibel M.J., Stepan J. (2000): The use of biochemical makers of bone turnover in osteoporosis. *Osteoporosis Int.*; 6: 2-17
- Donabédian M., van Weeren P.R., Perona G., Fleurance G., Robert C., Léger S., Bergero D., Lepage O., Martin-Rosset W. (2008): Early changes in biomarkers of skeletal metabolism and their association to the occurrence of osteochondrosis (OC) in the horse. *Equine Vet.*; 40: 253-259
- Dumont B., Dutronc A., Petit M. (1998): How readily will sheep walk for a preferred forage? *J. Anim. Sci.*; 76: 965-971
- Dumont B., Farruggia A., Garel J.-P., Bachelard P., Boitier E., Frain M. (2009): How does grazing intensity influence the diversity of plants and insects in a species-rich upland grassland on basalt soils? *Grass Forage Sci.*; 64: 92-105
- Duncan A.J., Reid S.A., Thoss V., Elston D.A. (2005): Browse selection in response to simulated seasonal changes in diet quality through postingestive effects. *J. Chem. Ecol.*; 31: 729-744
- Duncan R.L., Turner C.H. (1995): Mechanotransduction and the functional response of bone mechanical strain. *Calcif. Tissue Int.*; 57: 344-358
- Duncan A.J., Young S.A. (2002): Can goats learn about foods through conditioned food aversions and preferences when multiple food options are simultaneously available? *J. Anim. Sci.*; 80: 2091-2098
- Eckstein F., Hudelmaier M., Putz R. (2006): Review: The effects of exercise on human articular cartilage. *J. Anat.*; 208: 491-512
- Eckstein F., Tieschky M., Faber S., Englmeier K.-H., Reiser M. (1999): Functional analysis of articular cartilage deformation, recovery, and fluid flow following dynamic exercise in vivo. *Anat. Embryol.*; 200:419-424
- Edwards P.J., Berry N.R., Güsewell S., Jewell P.L., Kreuzer M. (2004): Long-term effects of cattle grazing upon the phosphorus status of alpine pastures. *Grassland Sci. Eur.*; 9: 302-304

- Emslander H.C., Sinaki M., Muhs J.M., Chao E.Y., Wahner H.W., Bryant S.C., Riggs B.L., Eastell R. (1998): Bone mass and muscle strength in female college athletes (runners and swimmers). *Mayo. Clin. Proc.*; 73: 1151–1160
- Engelke K. (2002): Quantitative Computertomographie. *J. Miner. Stoffwechs.*; 9: 22-31
- Etherington J., Harris P.A., Nandra D., Hart D.J., Wolman R.L., Doyle D.V., Spector T.D. (1996): The effect of weight-bearing exercise on bone mineral density: a study of female ex-elite athletes and the general population. *J. Bone Miner. Res.*; 11: 1333–1338
- Fierro L.C., Bryant F.C. (1990): Grazing activities and bioenergetics of sheep on native range in southern Peru. *Small Rum. Res.*; 3: 135-146
- Firth E.C. (2006): Review: The response of bone, articular cartilage and tendon to exercise in the horse. *J. Anat.*; 208: 513-526
- Fortune C.L., Farrugia W., Tresham J., Scoggins B.A., Wark J.D. (1989): Hormonal regulation of osteocalcin plasma production and clearance in sheep. *Endocrinology*; 124: 2785-2790
- Fraser D.R., Kodicek E. (1970): Unique biosynthesis by kidney of a biologically active vitamin D metabolite. *Nature*; 228: 764-766
- Frost H.M. (1964): Dynamics of bone remodelling.  
In: Frost H.M. (ed.). *Bone biodynamics*. Little Brown, Boston: 315-334
- Frost H.M. (1997): On our age-related bone loss: insights from a new paradigm. *J. Bone Miner. Res.*; 12: 1539-1546
- Frost H.M., Schönau E. (2000): The „Muscle-Bone Unit“ in Children and Adolescents: A 2000 Overview. *J. Pediatr. Endocrinol. Met.*; 13: 571-590
- Gall, C. (2001): *Ziegenzucht*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart (Hohenheim)
- Gasser R.W. (2001): Anwendung und klinische Relevanz der Bestimmung von Knochenumbau markern bei Osteoporose: Ein Überblick. *J. Miner. Stoffwechs.*; 3: 15-19
- Genant H.K., Engelke K., Fuerst T., Glüer C.C., Grampp S., Harris S.T., Jergas M., Lang T., Lu Y., Majumdar S., Mathur A., Takada M. (1996): Noninvasive assessment of bone mineral and structure: state of the art. *J. Bone Miner. Res.*; 11: 707-730
- Giezendanner R. (2009): Effekte des „Periost-stripping“ auf den Knochenstoffwechsel von Fohlen und Lämmern. Diss. Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich
- Goseki M., Omi N., Oida S., Ezawa I., Sasaki S. (1995): Voluntary exercise increases osteogenetic activity in rat bones. *Bull. Tokyo Med. Dent. Univ.*; 42: 1-8
- Grampp S. (2002): Klinische Anwendung der Densitometrie. *J. Miner. Stoffwechs.*; 9: 16-21
- Grumbles R.M., Howell D.S., Howard G.A., Roos B.A., Setton L.A., Mow V.C., Ratcliffe A., Muller F.J., Altman R.D. (1995): Cartilage metalloproteases in disuse atrophy. *J. Rheumatol. Suppl.*; 43: 146–148
- Guillemand J.A., Accarie C.M., de la Gueronniere V., Guillemand S.E. (2003): Different acute responses of serum type I collagen telopeptides, CTX, NTX and ICTP, after repeated ingestion of calcium. *Clin. Chim. Acta*; 337: 35-41
- Haapala J., Arokoski J.P., Hyttinen M.M., Lammi M., Tammi M., Kovanen V., Helminen H.J., Kiviranta I. (1999): Remobilization does not fully restore immobilization induced articular cartilage atrophy. *Clin. Orthop.*; 362: 218–229



- Haapasalo H., Kontulainen S., Sievänen H., Kannus P., Järvinen M., Vuori I. (2000): Exercise-induced bone gain is due to enlargement in bone size without a change in volumetric bone density: a peripheral quantitative computed tomography study of the upper arms of male tennis players. *Bone*; 27: 351-357
- Hagihara Y., Fukuda S., Goto S., Iida H., Yamazaki M., Moriya H. (2005): How many days per week should rats undergo running exercise to increase BMD? *J. Bone Miner. Metab.*; 23: 289-294
- Hanson D.A., Weiss M.A.E., Boller A., Maslan S.L., Singer F.R., Eyre D.R. (1992): A specific immunoassay for monitoring human bone resorption: Quantitation of type I collagen cross-linked N-telopeptides in urine. *J. Bone Min. Res.*; 7: 1251-1258
- Haussler M.R. (1986): Vitamin D Receptors: Nature and Function. *Ann. Rev. Nutr.*; 6:527-62
- Heinonen A., Oja P., Kannus P., Sievanen H., Manttari A., Vuori I. (1993): Bone mineral density of female athletes in different sports. *Bone Miner.*; 23: 1-14
- Helal I.E., Misumi K., Tateno O., Kodama T., Ishimaru M., Yamamoto J., Miyakoshi D., Fujiki M. (2007): Effect of exercise on serum concentration of cartilage oligomeric matrix protein in Thoroughbreds. *Am. J. Vet. Res.*; 68: 134-140
- Henrotin Y., Addison S., Kraus V., Deberg M. (2007): Type II collagen markers in osteoarthritis: What do they indicate? *Curr. Opin. Rheumatol.*; 19:444-450
- Hiney K.M., Nielsen B.D., Rosenstein D. (2004a): Short-duration exercise and confinement alters bone mineral content and shape in weanling horses. *J. Anim. Sci.*; 82: 2313-2320
- Hiney K.M., Nielsen B.D., Rosenstein D., Orth M.W., Marks B.P. (2004b): High-intensity exercise of short duration alters bovine bone density and shape. *J. Anim. Sci.*; 82: 1612-1620
- Hinterwimmer S., Krammer M., Krotz M., Glaser C., Baumgart R., Reiser M., Eckstein F. (2004): Cartilage atrophy in the knees of patients after 7 weeks of partial load bearing. *Arthritis Rheum.*; 50: 516-520
- Hofer C., Boessinger M., Buchmann M (2002): Graslandnutzung durch das Schaf. Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaues AGFF, 8046 Zürich-Reckenholz, CH
- Hoflund S. (1974): Beitrag zum Verhalten der Schafe. *Dtsch. Tierärztl. Wschr.*; 81: 616-617
- Hofmann R.R. (1989): Evolutionary Steps of ecophysiological adaption and diversification of ruminants: a comparative view of their digestive system. *Oecologia*; 78: 443-457
- Holick M.F., Schnoes H.K., DeLuca H.F., Gray R.W., Boyle I.T., Suda T. (1972): Isolation and identification of 24,25-Dihydroxycholecalciferol, a metabolite of vitamin D3 made in kidney. *Biochemistry*; 11: 4251-4255
- Holick M.F., Mac Laughlin J.A., Clark M.B., Holick S.A., Potts J.T. Jr., Anderson R.R., Blank I.H., Parrish J.A., Elias P. (1980): Photosynthesis of previtamin D3 in human skin and the physiologic consequences. *Science*; 210: 203-205
- Holick M.F., Mac Laughlin J.A., Doppelt S.H. (1981): Regulation of cutaneous previtamin D3 photosynthesis in man: skin pigment is not an essential regulator. *Science*; 211: 590-593
- Holick M.F. (2002): Vitamin D: the underappreciated D-lightful hormone that is important for skeletal and cellular health. *Curr. Opin. Endocrinol. Diabetes*; 9: 87-98
- Horcajada M.-N., Coxam V., Davicco M.-J., Gaumet N., Pastoureau P., Leterrier C., Culioli J., Barlet J.-P. (1997): Influence of treadmill running on femoral bone in young orchidectomized rats. *J. Appl. Physiol.* 83: 129-133

- Horst R.L., Littledike E.T. (1982): Comparison of plasma concentrations of vitamin D and its metabolites in young and aged domestic animals. *Comp. Biochem. Physiol.*; 3: 485-489
- How K.L., Hazewinkel H.A.W., Mol J.A. (1994): Dietary Vitamin D dependence of cat and dog due to inadequate cutaneous synthesis of vitamin D. *Gen. Comp. Endocrin.*; 96: 12-18
- Huang T.H., Lin S.C., Chang F.L., Hsieh S.S., Liu S.H., Yang R.S. (2003): Effects of different exercise modes on mineralization, structure, and biomechanical properties of growing bone. *J. Appl. Physiol.*; 95: 300-307
- Huber K. (2003): Molekulare Grundlagen der Phosphor-Homöostase beim kleinen Wiederkäuer. Habilitationsschrift der Tierärztlichen Hochschule Hannover; Physiologisches Institut
- Hudelmaier M., Glaser C., Englmeier K.H., Reiser M., Putz R., Eckstein F. (2003): Correlation of knee-joint cartilage morphology with muscle cross-sectional areas vs. anthropometric variables. *Anat. Rec. A. Discov. Mol. Cell. Evol. Biol.*; 270:175-184
- Huebner J.L., Kraus V.B. (2006): Assessment of the utility of biomarkers of osteoarthritis in the guinea pig. *Osteoarthr. Cartilage*; 14: 923-930
- Hüttenmoser D. (2007): Einfluss der Alpung auf den Knochenstoffwechsel bei wachsenden Schafen. Diss. Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich
- Isac M.D., Garcia M.A., Aguilera J.F., Molina Alcaide E. (1994): A comparative study of nutrient digestibility, kinetics of digestion and passage and rumen fermentation pattern in goats and sheep offered medium quality forages at the maintenance level of feeding. *Arch. Tierernähr.*; 46: 37-50
- Isselstein J., Griffith B.A., Pradel P., Venerus S. (2007): Effects of livestock breed and grazing intensity on biodiversity and production in grazing systems. 1. Nutritive value of herbage and livestock performance. *Grass Forage Sci.*; 62: 145-158
- Iwamoto J., Shimamura C., Takeda T., Abe H., Ichimura S., Sato Y. (2004): Effects of treadmill exercise on bone mass, bone metabolism, and calciotropic hormones in young growing rats. *J. Bone Miner. Metab.*; 22: 26-31
- Jeroch H., Drochner W., Simon O. (1999): Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart (Hohenheim), Deutschland
- Jewell P. (2002): Impact of cattle grazing upon the vegetation of an Alpine pasture. Wissenschaftsverlag Vauk, Kiel KG, Deutschland, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, Switzerland, Ph.D. thesis 14547
- Jones G., Vriezen D., Lohnes D., Palda V., Edwards N.S. (1987): Side chain hydroxylation of vitamin D3 and its physiological implications. *Steroids*; 49: 29-55
- Jones G., Strugnell S.A., DeLuca H.F. (1998): Current understanding of the molecular actions of vitamin D. *Physiol. Rev.*; 78: 1193-1231
- Joo Y.-I., Sone T., Fukunaga M., Lim S.-G., Onodera S. (2003): Effects of endurance exercise on three-dimensional trabecular bone microarchitecture in young growing rats. *Bone*; 33: 485-493
- Judson G.J., Filsell O.H., Jarrett I.G. (1976): Glucose and acetate metabolism in sheep at rest and during exercise. *Aust. J. Biol. Sci.*; 29: 215-222
- Junqueira L.C., Carneiro J., Kelley R.O. (2002): Knochen. In: Histologie, 5. Auflage. Springer Verlag, Berlin: 91-106
- Jurvelin J., Kiviranta I., Tammi M., Helminen H.J. (1986): Effect of physical exercise on indentation stiffness of articular cartilage in the canine knee. *Int. J. Sports Med.*; 7:106-110

- Jurvelin J., Kiviranta I., Säämänen A.M., Tammi M., Helminen H.J. (1990): Indentation stiffness of young canine knee articular cartilage-influence of strenuous joint loading. *J. Biomech.*; 23: 1239-1246
- Kaune R. (2000): Knochenstoffwechsel.  
In: Physiologie der Haussäugetiere, Eds.: von Engelhardt W., Breves G.
- Keller P. (2006): Vegetationskundliche Untersuchungen und Ertrag der Grünlandflächen im Gebiet der ETH-Forschungsstation Alp Weissenstein GR. Diplomarbeit; Geographisches Inst. Uni. Zürich
- Kersting U.G., Stubendorff J.J., Schmidt M.C., Brüggemann G.-P. (2005): Changes in knee cartilage volume and serum COMP concentration after running exercise. *Osteoarthr. Cartilage*; 13: 925-934
- Kirchgeßner M. (2004): Tierernährung. DLG-Verlags-GmbH, D-60489 Frankfurt am Main
- Kirchhofer W. (1982– 2000): Klimaatlas der Schweiz. Bundesamt für Landestopographie, Wabern.
- Kiviranta I., Tammi M., Jurvelin J., Säämänen A.M., Helminen H.J. (1988): Moderate running exercise augments glycosaminoglycans and thickness of articular cartilage in the knee joint of young beagle dogs. *J. Orthop. Res.*; 6: 188-195
- Kiviranta I., Tammi M., Jurvelin J., Arokoski J., Säämänen A.-M., Helminen H.J. (1992): Articular Cartilage Thickness and Glycosaminoglycan Distribution in the Canine Knee Joint After Strenuous Running Exercise. *Clin. Orthop. Relat. Res.*; 283:302-308
- Klapp E. (1965): Grünlandvegetation und Standort. Parey Verlag, Hamburg: 113
- Kneubühl M., Roder N. (2008): Alpweiden pflegen- Nutzungsfehler korrigieren. *Landfreund*; 6: 25-29
- Knowles T.G. (1998): A review of the road transport of slaughter sheep. *Vet. Rec.*; 143: 212-219
- Kong S.Y., Stabler T.V, Criscione L.G., Elliott A.L., Jordan J.M., Kraus V.B. (2006): Diurnal Variation of Serum and Urine Biomarkers in Patients With Radiographic Knee Osteoarthritis. *Arthritis Rheum.*; 54: 2496-2504
- Körner C., Nakhutsrishvili G., Spehn E. (2006): High-elevation land use, biodiversity, and ecosystem functioning. In: Spehn E.M., Liberman M., Körner C. (Eds.): Land use change and mountain biodiversity. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, London New York: 3-21
- Kreuzer M., Langhans W., Sutter F., Christen R.E., Leuenberger H., Kunz P.L. (1998): Metabolic response of early-lactating cows exposed to transport and high altitude grazing conditions. *Anim. Sci.*; 67: 237-248
- Kronberg S.L., Malechek J.C. (1997): Relationships between nutrition and foraging behaviour of free-ranging sheep and goats. *J. Anim. Sci.*; 75: 1756-1763
- Lachica M., Aguilera J.F. (2003): Estimation of energy needs in the free-ranging goat with particular reference to the assessment of its energy expenditure by the <sup>13</sup>C-bicarbonate method. *Small Rum. Res.*; 49: 303-318
- Lachica M., Aguilera J.F. (2005): Energy expenditure of walk in grassland for small ruminants. *Small Rum. Res.*; 59: 105-121
- Lachica M., Barroso F.G., Prieto C. (1997): Seasonal variation of locomotion and energy expenditure in goats under range grazing conditions. *J. Range Manage.*; 50: 234-238

- Lachica M., Somlo R., Barroso F.G., Boza J., Prieto C. (1999): Goats locomotion energy expenditure under range grazing conditions: Seasonal variation. *J. Range Manage.*; 52: 431-435
- Lai Y.M., Qin L., Hung V.W.Y., Chan K.M. (2005): Regional differences in cortical bone mineral density in the weight-bearing long bone shaft - A pQCT study. *Bone*; 36: 465-471
- Lambert H.L., Eastell R., Karnik K., Russell J.M., Barker M.E. (2008): Calcium supplementation and bone mineral accretion in adolescent girls: an 18-mo randomized controlled trial with 2-y follow-up. *Am. J. Clin. Nutr.*; 87: 455-62
- Lanyon L.E., Rubin C.T. (1984): Static vs dynamic loads as an influence on bone remodelling. *J. Biomech.*; 17: 897-905
- Leiber F., Kreuzer M., Jörg B., Leuenberger H., Wettstein H.-R. (2004): Contribution of altitude and Alpine origin of forage to the influence of Alpine sojourn of cows on intake, nitrogen conversion, metabolic stress and milk synthesis. *Anim. Sci.*; 78: 451-466
- Leiber F., Kreuzer M., Leuenberger H., Wettstein H.-R. (2006): Contribution of diet type and pasture conditions to the influence of high altitude grazing on intake, performance and composition and renneting properties of the milk of cows. *Anim. Res.*; 55: 37-53
- Leiber F., Kreuzer M., Nigg D., Wettstein H.-R., Scheeder M.R.L. (2005a): A Study on the Causes for the Elevated n-3 Fatty Acids in Cows' Milk of Alpine Origin. *Lipids*; 40: 191-202
- Leiber F., Liesegang A., Kreuzer M., Wettstein H.-R. (2005b): Concentrations of 25-hydroxy vitamin D in plasma of dairy cows at different exposure to solar radiation. In: *Vitamine und Zusatzstoffe in der Ernährung von Mensch und Tier. Micro Nutr.*, 10.Symp., Jena: 309-312
- Lepage O.M., Carstanjen B., Uebelhart D. (2001): Review. Non-Invasive Assessment of Equine Bone: An Update. *Vet. J.*; 161: 10-23
- Li K.W., Williamson A.K., Wang A.S., Sah R.L. (2001): Growth responses of cartilage to static and dynamic compression. *Clin. Orthop. Relat. Res.*; 391: 34-48
- Liebich H.G. (2004): *Funktionelle Histologie der Haussäugetiere*. 4. Auflage. Schattauer-Verlag.
- Liesegang A. (2003): Possibilities of Monitoring Bone Metabolism in Ruminants-an Overview of the Methods in Use. *Acta vet. scand.*; 97: 23-28
- Liesegang A., Sassi M.L., Risteli J. (2003): Diurnal variation in concentrations of various markers of bone metabolism in growing female goats and sheep. *Anim. Sci.*; 77: 197-203
- Liesegang A., Risteli J. (2005): Influence of different calcium concentrations in the diet on bone metabolism in growing dairy goats and sheep. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*; 89: 113-119
- Liesegang A., Risteli J., Wanner M. (2006): The effects of first gestation and lactation on bone metabolism in dairy goats and milk sheep. *Bone*; 38: 794-802
- Liesegang A., Risteli J., Wanner M. (2007): Bone metabolism of milk goats and sheep during second pregnancy and lactation in comparison to first lactation. *J. Anim. Physiol. An. N.*; 91: 217-225
- Lips P. (2006): Vitamin D physiology. *Pro. Biophys. Mol. Biol.*; 92: 4-8
- Lohmander L.S., Atley L.M., Pietka T.A., Eyre D.R. (2003): The release of crosslinked peptides from type II collagen into human synovial fluid is increased soon after joint injury and in osteoarthritis. *Arthritis Rheum.*; 48: 3130-3139



- Loosli J.K., Williams H.H., Thomas W.E., Ferris F.H., Maynard L.A. (1949): Synthesis of Amino Acids in the Rumen. *Science*; 110: 144-145
- Loretz, C. (2003): Untersuchungen zum Verhalten von behornnten und hornlosen Ziegen im Laufstall am Fressplatz und im Liegebereich. Dissertation Veterinärmedizinische Fakultät Zürich
- Lu Y., Markel M.D., Swain C., Kaplan L.D. (2006): Development of Partial Thickness Articular Cartilage Injury in an Ovine Model. *J. Orthop. Res.*; 24:1974-1982
- Lyons R.K., Machen R., Forbes T.D.A. (1999): Understanding Forage Intake in Range Animals. Texas Agricultural Extension Service, The Texas A & M University Pub. L-5152
- Mac Laughlin J.A., Anderson R.R., Holick M.F. (1982): Spectral character of sunlight modulates photosynthesis of previtamin D3 and its photoisomers in human skin. *Science*; 216: 1001-1003
- Main R.P. (2007): Ontogenetic relationships between in vivo strain environment, bone histomorphometry and growth in the goat radius. *J. Anat.*; 210: 272–293
- Marks S.C., Hermey D.C. (1996): The structure and development of bone. In: Principles of bone biology. Bilezikian J.P., Raisz L.G., Rodan G.A. Academic Press, New York: 3-14
- Marks S.C., Odgren Jr. and P.R. (2002): The structure and development of the skeleton. University of Massachusetts medical School, Academic Press: 3-15
- Martens H. (2000): Physiologie des Magen-Darm-Kanals. In: Physiologie der Haustiere, von Engelhardt W., Breves G., Enke Verlag GmbH, Stuttgart
- Mayer A.C., Huovinen C., Stoeckli V., Kreuzer M. (2006): Plant species diversity, forest structure, and tree regeneration in subalpine wood pastures. In: Spehn E.M., Liberman M., Körner C. (Eds.): Land use change and mountain biodiversity. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, London New York: 251-260
- McCarthy R.N., Jeffcott L.B. (1992): Effects of treadmill exercise on cortical bone in the third metacarpus of young horses. *Res. Vet. Sci.*; 52: 28-37
- Michna, P., Eugster, W., Hiller, R., Zeeman, M. J., Wanner, H., (2009): Topoclimatological characteristics of the Alp Weissenstein research site in the Swiss Alps. *Die Erde*; in review
- Miller P.D., Baran D.T., Bilezikian J.P., Greenspan S.L., Lindsay R., Riggs B.L., Watts N.B. (1999): Practical clinical application of biochemical markers of bone turnover. *J. Clin. Densit.*; 2: 323-342
- Moreno C.A., Main R.P., Biewener A.A. (2008): Variability in forelimb bone strains during non-steady locomotor activities in goats. *J. Exp. Biol.*; 211: 1148-1162
- Mori T., Okimoto N., Sakai A., Okazaki Y., Nakura N., Notomi T., Nakamura T. (2003): Climbing exercise increases bone mass and trabecular bone turnover through transient regulation of marrow osteogenic and osteoclastogenic potentials in mice. *J. Bone Miner. Res.*; 18: 2002-2009
- Morris J. G. (1999): Ineffective Vitamin D Synthesis in Cats is reversed by an Inhibitor of 7-Dehydrocholesterol- $\Delta$ -Reductase. *J. Nutr.*; 129: 903-908
- Murray K.C., Whitton R.C., Vedi S., Goodship A.E., Lekeux P. (1999b): The effect of training on the calcified zone of equine middle carpal articular cartilage. *Equine Vet. J. Suppl.*; 30: 274-278
- Murray K. C.; Zhu C.F., Goodship A.E., Lakhani K.H., Agrawai C.M., Athanasiou K.A. (1999a): Exercise Affects the Mechanical Properties and Histological Appearance of Equine Articular Cartilage. *J. Orthop. Res.*; 17: 725-731

- Negi G.C.S., Rikhari H.C., Jeet Ram S.P. (1993): Foraging Niche Characteristics of Horses, Sheep and Goats in an Alpine Meadow of the Indian Central Himalaya. *J. Appl. Ecol.*; 30: 383-394
- Nelson F., Dahlberg L., Lavery S., Reiner A., Pidoux I., Ionescu M., Fraser G.L., Brooks E., Tanzer M., Rosenberg L.C., Dieppe P., Robin Poole A. (1998): Evidence for altered synthesis of type II collagen in patients with osteoarthritis. *J. Clin. Invest.*; 102: 2115-2125
- Nemere I., Norman A.W. (1988): 1.25-Dihydroxyvitamin D<sub>3</sub>-mediated vesicular transport of calcium in intestine: time-course studies. *Endocrinology*; 122: 2962-2969
- Neumann G. (2009):  
[http://www.loges.de/Welchen\\_Einfluss\\_hat\\_das\\_Klima\\_auf\\_die\\_Ausdauerleistung](http://www.loges.de/Welchen_Einfluss_hat_das_Klima_auf_die_Ausdauerleistung)
- Newton P.M., Mow V.C., Gardner T.R., Buckwalter J.A., Albright J.P. (1997): Winner of the 1996 Cabaud Award. The effect of lifelong exercise on canine articular cartilage. *Am. J. Sports Med.*; 25: 282-287
- Notomi T., Okazaki Y., Okimoto N., Tanaka Y., Nakamura T., Suzuki M. (2002): Effects of tower climbing exercise on bone mass, strength, and turnover in orchidectomized growing rats. *J. Appl. Physiol.*; 93: 1152-1158
- Notomi T., Okimoto N., Okazaki Y., Tanaka Y., Nakamura T., Suzuki M. (2001): Effects of tower climbing exercise on bone mass, strength, and turnover in growing rats. *J. Bone Miner. Res.*; 16: 166-174
- Nugent G.E., Law A.W., Wong E.G., Temple M.M., Bae W.C., Chen A.C., Kawcak C.E., Sah R.L. (2004): Site- and exercise-related variation in structure and function of cartilage from equine distal metacarpal condyle. *Osteoarthr. Cartilage*; 12: 826-833
- NRC: (1981): Nutrient Requirements of Goats: Angora, Dairy, and Meat Goats in Temperate and Tropical Countries. National Academy Press, Washington, D.C.
- NRC: (1985): Nutrient Requirements of Sheep.  
Sixth Revised Edition, National Academy Press, Washington, D.C.
- Ott E., Frehner M., Frey H.-U. und Lüscher P. (1997): Gebirgsnadelwälder – Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Ed.: Haupt P., Bern, Schweiz
- Parfitt A.M. (1981): Bone effects of space flight: analysis by quantum concept of bone remodelling. *Acta Astronaut.*; 8: 1083-1090
- Pethick D.W., Harman N., Chong J.K. (1987): Non-esterified long-chain fatty acid metabolism in fed sheep at rest and during exercise. *Aust. J. Biol. Sci.*; 40: 221-234
- Pfister J.A., Malechek J.C. (1986): The Voluntary Forage Intake and Nutrition of Goats and Sheep in the Semi-arid Tropics of Northeastern Brazil. *J. Anim. Sci.*; 63:1078-1086
- Plochocki J.H., Rivera J.P., Zhang C., Ebba S. A. (2008): Bone modeling response to voluntary exercise in the hindlimb of mice. *J. Morphol.*; 269: 313-318
- Poole A.R., Ionescu M., Fitzcharles M.A., Billingham R.C. (2004): The assessment of cartilage degradation in vivo: development of an immunoassay for the measurement in body fluids of type II collagen cleaved by collagenases. *J. Immunol. Methods*; 294: 145-153
- Porzig E., Sambras H.H. (1991): Nahrungsaufnahmeverhalten landwirtschaftlicher Nutztiere. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin GmbH
- Power M.J., Fottrell P.F., (1991): Osteocalcin: Diagnostic methods and clinical applications. *Crit. Rev. Clin. Lab. Sci.*; 28: 287-335

- Provot S., Schipani E. (2005): Molecular mechanisms of endochondral bone development. *Biochemical and Biophysical Research Communications*; 328: 658–665
- Puustjärvi K., Lappalainen R., Niemitukia L., Arnala I., Nieminen J., Tammi M., Helminen H.J. (1995): Long-distance running alters bone anthropometry, elemental composition and mineral density of young dogs. *Scand. J. Med. Sci. Sports*; 5: 17-23
- Quarterman J., Dalgarno A.C., Adam A (1964): Some factors affecting the level of vitamin D in the blood of sheep. *Brit. J. Nutr.*; 18: 79-89
- Raab D.M., Smith E.L., Crenshaw T.D., Thomas D.P. (1990): Bone mechanical properties after exercise training in young and old rats. *J. Appl. Physiol.*; 68: 130–134
- Radin E.L., Orr R.B., Kelman J.L., Paul I.L., Rose R.M. (1982): Effect of prolonged walking on concrete on the knees of sheep. *J. Biomech.*; 15: 487–492
- Rahmann G. (2000): Biotoppflege als neue Funktion und Leistung der Tierhaltung. Dargestellt am Beispiel der Entbuschung von Kalkmagerrasen mit Ziegen. Habilitationsschrift FB 11 Ökologische Agrarwissenschaften der Uni GhK, Verlag Dr. Kovac, Hamburg, ISBN 3-8300-0109-6
- Rahmann G. (2007): Ökologische Schaf- und Ziegenhaltung. 100 Fragen und Antworten für die Praxis. Institut für Ökologischen Landbau, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Westerau
- Rakovac M., Heimer S., Prskalo I. (2007): Influence of regular physical activity on bone mineral density in postmenopausal women. 12th Ann. Congress ECSS, July 2007, Jyväskylä, Finland
- Ramirez R.G., Loyo A., Mora R., Sanchez E.M., Chaire A. (1991): Forage intake and nutrition of range goats in a shrubland in Northeastern Mexico. *J. Anim. Sci.*; 69: 879-885
- Raub R.H., Jackson S.G., Baker J.P. (1989): The effect of exercise on bone growth and development in weanling horses. *J. Anim. Sci.*; 67: 2508-2514
- Rauch F., Schoenau E. (2001): The Developing Bone: Slave or Master of Its Cells and Molecules? *Pediatr. Res.*; 50: 309-314
- Reisigl H., Keller R. (1994): Alpenpflanzen im Lebensraum. 2.Aufl., Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- Reist M., Erdin D., von Euw D., Tschuemperlin K., Leuenberger H., Chilliard Y., Hammon H.M., Morel C., Philipona C., Zbinden Y., Kuenzi N., Blum J.W. (2002): Estimation of Energy Balance at the Individual and Herd Level Using Blood and Milk Traits in High-Yielding Dairy Cows. *J. Dairy Sci.*; 85: 3314-3327
- Rico H., Gonzalez-Riola J., Revilla M., Villa L.F., Gomez-Castresana F., Escribano J. (1994): Cortical versus trabecular bone mass: influence of activity on both bone components. *Calcif. Tissue Int.*, 54:470-472
- Ringe J.D., Steinhagen-Thiessen E. (1985): Prevention of physiological age-dependent bone atrophy by controlled exercise in mice. *Age*; 2: 44–47
- Roberts G., Williams A., Last J.D., Penning P.D., Rutter S.M. (1995): A low-power postprocessed DGPS system for logging the locations of sheep on hill pasture. *Navigation*; 42: 327-336
- Ross M.H., Pawlina W. (2006): Histology. A Text And Atlas. With correlated cell and molecular biology. 5th Edition; Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore/ Philadelphia, USA
- Rubin C.T., Lanyon L.F. (1985): Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. *Calcif. Tissue Int.*; 37: 411-417

- Rutter S.M., Beresford N.A., Roberts G. (1997): Use of GPS to identify the grazing areas of hill sheep. *Comput. Electron. Agr.*; 17: 177-188
- Sah R.L., Kim Y.J., Doong J.Y., Grodzinsky A.J., Plaas A.H., Sandy J.D. (1989): Biosynthetic response of cartilage explants to dynamic compression. *J. Orthop. Res.*; 7: 619–636
- Sahlu T., Goetsch A.L., Luo J., Nsahlai I.V., Moored J.E., Galyean M.L., Owens F.N., Ferrell C.L., Johnson Z.B. (2004): Nutrient requirements of goats: developed equations, other considerations and future research to improve them. *Small Rum. Res.*; 53: 191–219
- Samraus, H.H. (1978): *Nutztierethologie*. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg
- Sano H., Nakamura S., Kobayashi S., Takahashi H., Terashima Y. (1995): Effect of Cold Exposure on Profiles of Metabolic and Endocrine Responses and on Responses to Feeding and Arginine Injection in Sheep. *J. Anim. Sci.*; 73: 2054-2062
- Sauvant D., Morand-Fehr P. (1991): Energy requirements and allowances of adult goats. In: *Goat nutrition*. Pudoc, Wageningen: 61-72
- Schießl H., Willnecker J. (2000): Neue Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Knochenstabilität und Muskelkraft. [www.galileo2000.de/literatur/php?t=1](http://www.galileo2000.de/literatur/php?t=1)
- Schmid S. (2007): Funktionelle und pflanzensoziologische Charakterisierung der alpin-subnivalen Vegetation im Gebiet der ETH-Forschungsstation Alp Weissenstein am Albulapass (GR, Schweiz). Diplomarbeit am Institut für Pflanzenwissenschaften der ETH Zürich, Graslandwissenschaften
- Schneider S., Breit S.M., Grampp S., Künzel W.W., Liesegang A., Mayrhofer E., Zentek J. (2004): Comparative assessment of bone mineral measurements obtained by use of dual-energy x-ray absorptiometry, peripheral quantitative computed tomography, and chemical-physical analyses in femurs of juvenile and adult dogs. *Am. J. Vet. Res.*; 65: 891-900
- Schönau E. (2002): Der Muskel als Knochenpilot. In: *Gesund! –Bis auf die Knochen?* Bundesanstalt für Milchforschung Kiel, Ernährungsforum des Instituts Danone für Ernährung e.V.
- Schönau E., Frost H.M. (2002): The „Muscle-Bone Unit“ in children and adolescents. *Calcif. Tissue Int.*; 70: 405-407
- Schönau E., Neu C.M., Beck B., Manz F., Rauch F. (2002): Bone Mineral Content per Muscle Cross-Sectional Area as an Index of the Functional Muscle-Bone-Unit. *J. Bone Miner. Res.*; 17: 1095-1101
- Schubiger F.X., Dietl W., Bosshard H.-R. (1999): Nährwert von Futterpflanzen und Weiden des Berggebietes. Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaues, Zürich, Montagna; 6:I-VIII
- Scott D., Abu Damir H., Buchan W., Duncan A., Robins S.P. (1993): Factors affecting urinary pyridinoline and deoxypyridinoline excretion in the growing lamb. *Bone*; 14: 807-811
- Scott D., Robins S.P., Nicol P., Chen X.B., Buchan W. (1994): Effects of low phosphate intake on bone and mineral metabolism and microbial protein synthesis in lambs. *Exp. Physiol.*; 79: 183-187
- Scott D., Loveridge N., Nicodemo L., Buchan W., Milne J., Duncan A., Nicol P., Robins S.P. (1997): Effects of diets varying in nitrogen or phosphorus content on indicators of bone growth in lambs. *Exp. Physiol.*; 82: 193-202
- Seibel M.J. (2000): Molecular Markers of Bone Turnover: Biochemical, Technical and Analytical Aspects. *Osteoporos. Int.*; 6: 18-29



- Sevi A., Annicchiarico G., Albenzio M., Taibi L., Muscio A., Dell'Aquila S. (2001): Effects of Solar Radiation and Feeding Time on Behaviour, Immune Response and Production of Lactating Ewes Under High Ambient Temperature. *J. Dairy Sci.*; 84:629–640
- Shinde A.K., Karim S.A. (2007): Energy expenditure of sheep and goats at pasture – A review. *Indian J. Small Ruminants*; 13; ISSN 0971 9857
- Silbernagel S., Despopoulos A. (2001): Taschenatlas der Physiologie. Thieme Verlag: 290-293
- Simon M.R. (1978): The effect of dynamic loading on the growth of epiphyseal cartilage in the rat. *Acta. Anat. (Basel)*; 102:176–183
- Skerry T.M., Lanyon L.E. (1995): Interruption of disuse by short duration walking exercise does not prevent bone loss in the sheep calcaneus. *Bone*; 16: 269-274
- Slee J. (1971): Physiological factors affecting the energy cost of cold exposures. *P. Nutr. Soc.*; 30: 215-221
- Smith B.S.W., Wright H. (1980): The response of serum 25-hydroxyvitamin D concentrations to vitamin D intake and insolation in sheep. *Br. J. Nutr.*; 43: 533-539
- Smith B.S.W., Wright H. (1984): Relative contributions of diet and sunshine to overall vitamin D status of the grazing ewe. *Vet. Record*; 115: 537-538
- Soumaré A. (1981): Futteraufnahme von Ziegen auf unterschiedlicher Weide, sowie Untersuchungen zum Nahrungsaufnahmeverhalten. Diss agr. Hohenheim
- Spatz, G. (1994): Freiflächenpflege. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Spehn E.M., Liberman M., Körner C. (2006): Land use change and mountain biodiversity. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, London New York.
- Stadler F., Wiedmer E. (1999): Sömmerung von Schafen- Vorschläge zur Lösung der Probleme aus landschaftsökologischer Sicht/ Alpine Summer Sheep Pasturing-Proposals for Solution-Finding for Problems with a View to Landscape Ecology. *Schweiz. Z. Forstwesen*; 150: 347-353
- Suda T., Ueno Y., Fujii K., Shinki T. (2003): Vitamin D and bone. *J. Cell. Biochem.*; 88:259-266
- Swaminathan R. (2001): Biochemical markers of bone turnover. *Clin. Chim. Acta*; 313: 95-105
- Taaffe D.R., Snow-Harter C., Connolly D.A., Robinson T.L., Brown M.D., Marcus R. (1995): Differential effects of swimming versus weight-bearing activity on bone mineral status of eumenorrheic athletes. *J. Bone Miner. Res.*; 10: 586–593
- Thérier M., Bocquier F., Brelurut A. (1987): Recommandations alimentaires pour les brebis à l'entretien et en gestation. *Bull.Tech. C.R.V.Z. Theix, INRA 70*: 185-197
- Thompson G.E., Manson W., Clarke P.L., Bell A.W. (1978): Acute cold exposure and the metabolism of glucose and some of its precursors in the liver of the fed and fasted sheep. *Q. J. Exp. Physiol.*; 63: 189-199
- Tobias J.H., Steer C.D., Mattocks C.G., Riddoch C., Ness A.R. (2007): Habitual levels of physical activity influence bone mass in 11-year-old children from the United Kingdom: Findings from a large population-based cohort. *J. Bone Miner. Res.*; 22: 101-109
- Torzilli P.A., Grigienė R., Huang C., Friedman S.M., Doty S.B., Boskey A.L., Lust G. (1997): Characterization of cartilage metabolic response to static and dynamic stress using a mechanical explant test system. *J. Biomech.*; 30:1–9

- Trang H.M., Cole D.E.C., Rubin L.A., Pierratos A., Siu S., Vieth R. (1998): Evidence that vitamin D3 increases serum 25-hydroxyvitamin D more efficiently than does vitamin D2. *Am. J. Clin. Nutr.*; 68: 854-858
- Tschuor A.C., Riond B., Braun U., Lutz H. (2008): Hämatologische und klinisch-chemisch Referenzwerte für adulte Ziegen und Schafe. *Schweiz. Arch. Tierheilk.*; 150: 287-295
- Turner C.H. (1998): Three rules for bone adaption to mechanical stimuli. *Bone*; 23: 399-407
- Turner C.H. (2000): Muscle-Bone Interactions, Revisited. *Bone*; 27: 339-340
- Turner C.H., Forwood M.R., Otter M.W. (1994): Mechanotransduction in bone: do bone cells act as sensors of fluid flow? *FASEB J.*; 8:875–878
- Turner C.H., Owan I., Takano Y. (1995): Mechanotransduction in bone: The role of strain rate. *Am. J. Physiol.*; 269: 438-442
- Turner C.H., Pavalko F.M. (1998): Mechanotransduction and functional response of the skeleton to physical stress: the mechanisms and mechanics of bone adaptation. *J. Orthop. Sci.*; 3: 346-355
- Urban J.P. (1994): The chondrocyte: a cell under pressure. *Br. J. Rheumatol.*; 33: 901-908
- Vajda E.G., Bowman B.M., Miller S.C. (2001): Cancellous and Cortical Bone Mechanical Properties and Tissue Dynamics during Pregnancy, Lactation, and Postlactation in the Rat. *Biol. Reprod.*; 65: 689-695
- Valdimarsson Ö., Linden C. Johnell O., Gardsell P., Karlsson M.K. (2006): Daily physical education in the school curriculum in prepubertal girls during 1 year is followed by an increase in bone mineral accrual and bone width- Data from the prospective controlled Malmö Pediatric Osteoporosis Prevention Study. *Calcif. Tissue Int.*; 78: 65-71
- van de Lest C.H., Brama P.A., van Weeren P.R. (2003): The influence of exercise on bone morphogenic enzyme activity of immature equine subchondral bone. *Biorheology.*; 40: 377-382
- van Soest P.J., Robertson J.B., Lewis B.A. (1991): Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.*; 74: 3583-3597
- van Soest P.J. (1994): Nutritional Ecology of the Ruminant. Second Edition, Cornell University Press, Sage House, 512 East State Street, Ithaca, New York
- van Straalen J.P., Sanders E., Prummel M.F., Sanders G.T. (1991): Bone alkaline phosphatase as indicator of bone formation. *Clin. Chim. Acta*; 201: 27-33
- Vanwanseele B., Eckstein F., Hadwighorst H., Knecht H., Spaepen A., Stüssi E. (2004): In vivo precision of quantitative shoulder cartilage measurements, and changes after spinal cord injury. *Magnetic Resonance in Medicine*; 51: 1026-1030
- Vanwanseele B., Eckstein F., Knecht H., Spaepen A., Stüssi E. (2003): Longitudinal analysis of cartilage atrophy in the knees of patients with spinal cord injury. *Arthritis Rheum.*; 48: 3377-3381
- Vanwanseele B., Eckstein F., Knecht H., Stüssi E., Spaepen A. (2002b): Knee cartilage of spinal cord-injured patients displays progressive thinning in the absence of normal joint loading and movement. *Arthritis Rheum.*; 46: 2073-2078
- Vanwanseele B., Lucchinetti E., Stüssi E. (2002a): The effects of immobilization on the characteristics of articular cartilage: current concepts and future directions. *Osteoarth. Cartilage*; 10: 408-419
- von Engelhardt W., Breves G. (2000): Physiologie der Haustiere. Enke Verlag, Stuttgart

- von Korn S. (1992): Schafe in Koppel- und Hütelhaltung. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart
- von Korn S., Jaudas U., Trautwein H. (2007): Landwirtschaftliche Ziegenhaltung. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart (Hohenheim)
- von Wyl A., Mercier A., Troxler J. (1985): L`exploitation ovine en altitude. Schlussberichte zum Schweizerischen MAB-Programm; 10
- Wabern, (2000): Topographische Karte 1:25.000, Landeskarte der Schweiz, Blatt 1237 (Albulapass), swisstopo
- Wabern (2004): Übersichtskarte Schweiz, swisstopo
- Waldman S.D., Spiteri C.G., Grynepas M.D., Pilliar R.M., Kandel R.A. (2003): Long-term intermittent shear deformation improves the quality of cartilaginous tissue formed in vitro. J. Orthop. Res.; 21: 590-596
- Wang Q.J., Suominen H., Nicholson P.H.F., Zou L.C., Alen M., Koistinen A., Cheng S. (2005): Influence of physical activity and maturation status on bone mass and geometry in early pubertal girls. Scand. J. Med. Sci. Sports; 15: 100-106
- Westerlind K.C., Fluckey J.D., Gordon S.E., Kraemer W.J., Farrell P.A., Turner R.T. (1998): Effect of resistance exercise training on cortical and cancellous bone in mature male rats. J. Appl. Physiol.; 84: 459-464
- Whedon G.D. (1984): Disuse osteoporosis: physiological aspects. Calcif. Tissue Int.; 36: 146-150
- Wolff J. (1892): Das Gesetz der Transformation der Knochen. Berlin: Hirschwald A.
- Yeh J.K., Aloia J.F. (1990): Effect of physical activity on calciotropic hormones and calcium balance in rats. Am. J. Physiol.; 258: 263-268
- Yeh J.K., Chung C.L., Aloia J.F. (1993): Effects of exercise and immobilization on bone formation and resorption in young rats. Am. J. Physiol.; 264: 182-189
- Young D.R., Niklowitz W.J., Steele C.R. (1983): Tibial changes in experimental disuse osteoporosis in the monkey. Calcif. Tissue Int.; 35: 304-308
- Zanker C.L., Swaine I.L. (2000): Responses of bone turnover markers to repeated endurance running in humans under conditions of energy balance or energy restriction. Eur. J. Appl. Physiol., 83: 434-440
- Zanzinger J., Becker K., Rometsch M. (1993): Physiological response of Zebu and taurine oxen to draught work. J. Exp. Zool.; 266: 249-256
- Zemp M., Leuenberger H., Künzi N., Blum J.W. (1989a): Influence of high altitude grazing on productive and physiological traits of dairy cows. I Influence on milk production and body weight. J. Anim. Breed. Genet.; 106: 278-288
- Zemp M., Blum J.W., Leuenberger H., Künzi N. (1989b): Influence of high altitude grazing on productive and physiological traits of dairy cows. II Influence on hormones, metabolites and haematological parameters. J. Anim. Breed. Genet.; 106: 289-299
- Zierold C., Mings A.J., DeLuca H.F. (2003): Regulation of 25-Hydroxyvitamin D3-24-Hydroxylase mRNA by 1.25-Dihydroxyvitamin D3 and Parathyroid Hormone. J. of Cell. Biochem.; 88:234-237

## Danksagung

Zu guter Letzt möchte ich mich noch einmal herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt:

Meiner Referentin **PD Dr. Annette Liesegang** für die Überlassung dieses Themas, für die nette fachliche Unterstützung, die Hilfe bei der Durchführung und die schnelle Korrektur der Arbeit.

**Dr. Florian Leiber** für die nette fachkundige Unterstützung, Betreuung und Durchsicht dieser Arbeit.

Dem Korreferenten **Prof. Dr. M. Kreuzer** für die Übernahme der Begutachtung und das schnelle Korrektur lesen.

**Dr. Kerstin Lauff** für die stets tatkräftige und moralische Hilfe bei jeglichen Problemen und bei den Versuchen.

**Samuel Schmid** für die nette Unterstützung auf der Alp, für die Erstellung der Trackkarten und die fachliche botanische Hilfe.

**Ines Mittner, Carmen Kunz, Barbara Schneider und Irene Zbinden** für die Durchführung der Laborarbeiten.

**Prof. Dr. M. Wanner** für die Korrektur der Arbeit und die Finanzierung meiner Stelle.

**Joanna Schmid und Jürg Meyer**, die mir sehr bei der Arbeit mit den Tieren geholfen haben.

**Steffi Frieden**, die eine gute Antriebshilfe für meine Schafe war.

Meinem Lieblingskollegen **Thomas Häring** für die Hilfe bei den letzten Laborproben und die grossartige Bürogemeinschaft (red & ready), meinen wunderbaren Kolleginnen und tapferen Mitstreitern **Judith Vosmer** (danke fürs Drucken und Abgeben und überhaupt) **Martina Signer** und **Sara Weilenmann** für die nette Gemeinschaft und die zahlreiche, vor allem moralische Unterstützung.

**PhD M. Mohns** (Roche Diagnostics, CH) für die grosszügige Überlassung diverser Testkits.

**Dr. M. Kränzlin und Laborteam** für die Analyse des 25(OH)-Vitamin D.

**Dr. H.R. Wettstein** und dem Team der Alp Weissenstein.

**Gabriela Eger, Ursina Just und Rita Kant** für die Erledigung des Papierkram.

Den einfach weltbesten Freundinnen: **Anna, Olla und Sabrina**, meinem allerliebsten „Nachbarn“ **Tito und Ole** (Wette gewonnen ☺...danke für die GPS und Formatierungs-Tips). Auch haben mich noch viele liebe andere **Freunde** und **Familienmitglieder** unterstützt, die hier zwar nicht namentlich erwähnt sind, denen aber trotzdem mein herzlichster Dank gilt.

Besonders Danken möchte ich meinen **Eltern**, die mir nicht nur während der Dissertation und im Studium, sondern mein ganzes Leben lang, unterstützend und ermutigend in allen Lebenslagen beigestanden haben.

Auch möchte ich noch einmal alle meine Schafis (**Aida, Anja, Berti, Daisy, Emma, Espe, Flöckli, Flörli, Hermine, Liesel, Nina, Petzi, Susi, Sybil, Tina**) und Ziegen (**Amanda, Arielle, Edelweiss, Evelyne, Evita, Ginger, Laura, Leila, Leonie, Liesel, Salsa, Simba, Stella, Suala, Ursi**) namentlich erwähnt haben.

DANKE !





## Curriculum Vitae

Name	Carola Kaulfers
Geburtsdatum	5. März 1982
Geburtsort	Hamburg, Deutschland
Nationalität	Deutsch
1988 - 1992	Grundschule Furtweg, Hamburg
1992 - 2001	Gymnasium Dörpsweg, Hamburg
1998 - 1999	Sacred Heart College, Wanganui, Neuseeland
2001	Abitur
2002 – 2008	Studium der Veterinärmedizin an der Tierärztlichen Hochschule Hannover, Deutschland
März 2008	Abschlussprüfung an der Tierärztlichen Hochschule Hannover, Deutschland
2004 - 2005	Anstellung als Unterassistentin an der Rinderklinik, Tierärztliche Hochschule Hannover, Deutschland
2008 - 2009	Anstellung als Doktorandin am Institut für Tierernährung, Vetsuisse Fakultät Zürich, Schweiz
Juli 2009	Anstellung als Tierärztin in der Tierklinik Magunna & Nickel, Norderstedt, Deutschland
Juli 2009	

Dateiname: Diss 8.1. Druckendendendversion.doc  
Verzeichnis: C:\Dokumente und Einstellungen\Carola Kaulfers\Desktop  
Vorlage: C:\Dokumente und Einstellungen\Carola  
Kaulfers\Anwendungsdaten\Microsoft\Vorlagen\Normal.dot  
Titel: Einleitung  
Thema:  
Autor: Carola Kaulfers  
Stichwörter:  
Kommentar:  
Erstelldatum: 08.01.2010 14:01:00  
Änderung Nummer: 2  
Letztes Speicherdatum: 08.01.2010 14:01:00  
Zuletzt gespeichert von: Carola Kaulfers  
Letztes Druckdatum: 09.01.2010 10:39:00  
Nach letztem vollständigen Druck  
Anzahl Seiten: 148  
Anzahl Wörter: 46.223 (ca.)  
Anzahl Zeichen: 291.210 (ca.)